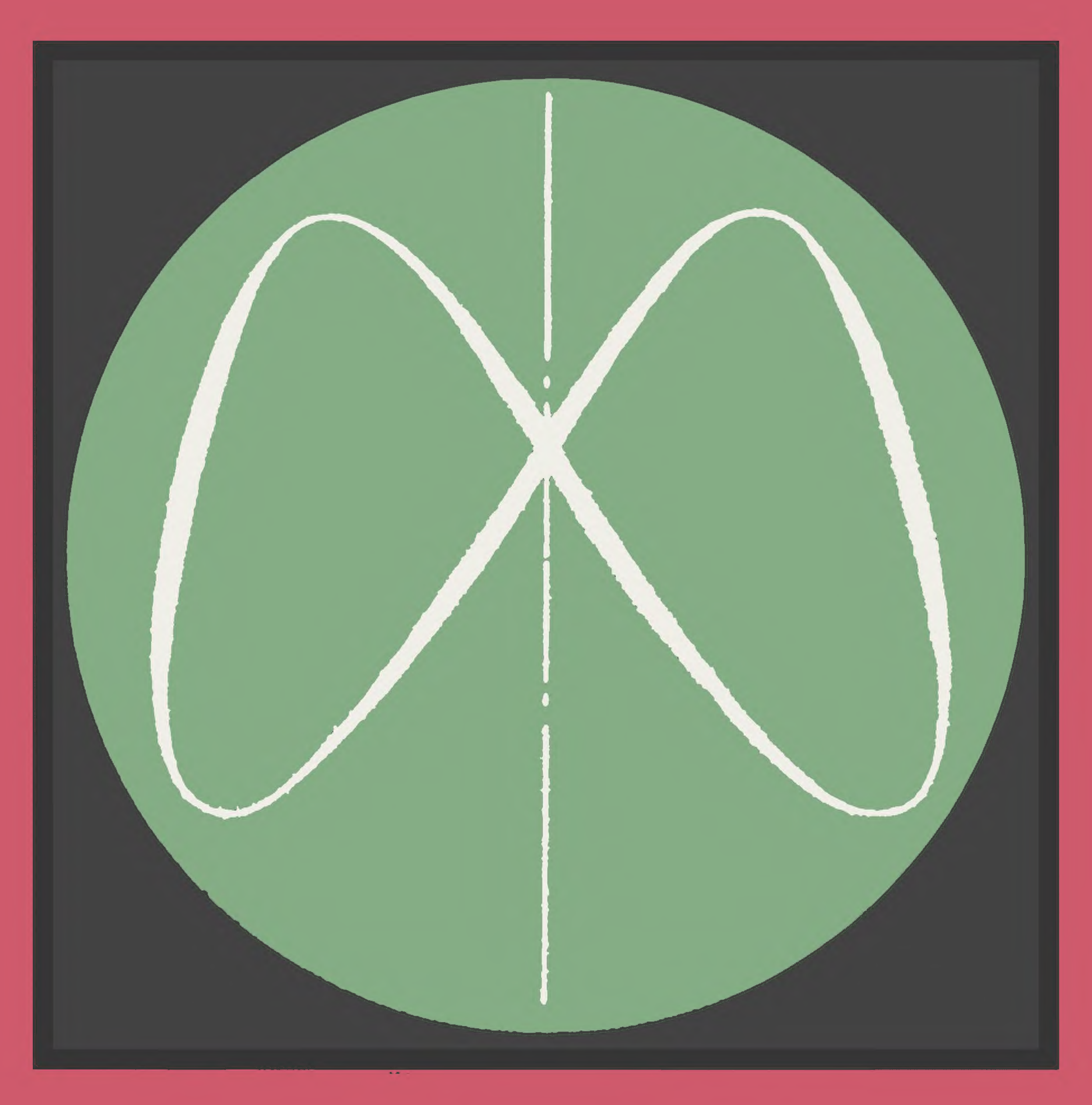




В. Я. СОЛОВОВ

ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

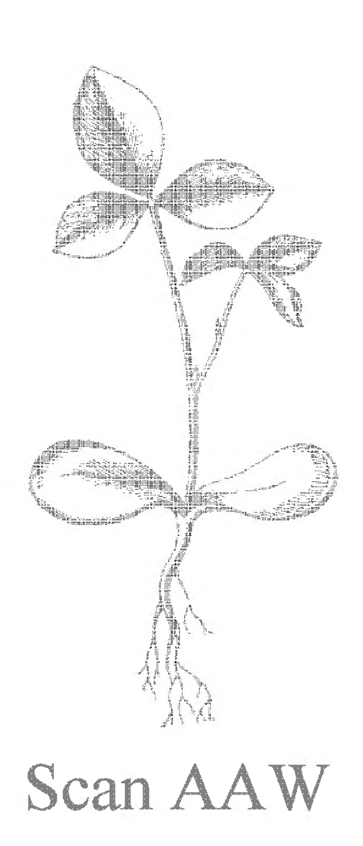
МАССОВАЯ
РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 883

В. Я. СОЛОВОВ

ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Издание второе, переработанное и дополненное





«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1975

6Ф2.08
С 60
УДК 621.317.755

ВЛАДИМИР ЯКОВЛЕВИЧ СОЛОВОВ

Осциллографические измерения

Редактор *В. В. Блинов*
Редактор издательства *В. А. Абрамов*
Обложка художника *А. А. Иванова*
Технический редактор *Л. Н. Никитина*
Корректор *Г. Г. Желтова*

Сдано в набор 6/IX 1974 г. Подписано к печати 11/V 1975 г. Т-09408
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 3,78 Уч.-изд. л. 4,79
Тираж 40 000 экз. Зак. 443 Цена 20 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 13 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
107005, Москва, Б-5, Денисовский пер , 30
Отпечатано в Московской типографии № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.
Зак. 252.

Соловов В. Я.

С 60 Осциллографические измерения. Изд. 2-е, перераб. и доп., М., «Энергия», 1975.

72 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 883).

Описаны практические способы использования электронно-лучевого осциллографа для измерения параметров различных электрических сигналов и характеристик узлов и элементов радиосхем.

В книге излагаются основные вопросы методики осциллографических измерений. Подробно описаны методы измерения частоты гармонических колебаний, измерение сдвига фаз, приведены схемы новых вспомогательных узлов.

Книга рассчитана на широкий круг радиолюбителей.

С $\frac{30405\text{-}355}{051(01)\text{-}75}$ 357-75 6Ф2.08

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Среди большого многообразия видов измерений, с которыми сталкиваются квалифицированные радиолюбители в своей повседневной практике, значительное место занимают осциллографические методы измерения и контроля.

Наиболее распространенным из них и посвящена эта книга, впервые выпущенная в свет в 1968 г. Как и в первом издании, в книге кратко излагаются принципы работы электронного осциллографа, основные вопросы методики осциллографических измерений, визуальное наблюдение осциллограмм и измерения с помощью калибраторов.

Параграф «Измерение частоты гармонических колебаний» значительно расширен. Более подробно описывается измерение сдвига фаз, приведены схемы новых вспомогательных узлов.

Исследование характеристик четырехполюсников в новом издании иллюстрируется сопоставлением их частотных характеристик с формой выходных импульсов, отражающих вид частотной характеристики. Даны принципиальные схемы простого электронного коммутатора и формирователя прямоугольного напряжения, выполненных на транзисторах.

На базе осциллографа рассматривается принцип работы вектор-метра, предназначенного для снятия амплитудно-фазовых частотных характеристик четырехполюсников.

Приведена принципиальная схема приставки к осциллографу, которая позволяет превратить его в характериограф для получения семейства различных характеристик транзисторов.

Все замечания и пожелания автор просит посылать по адресу: 113114, Москва, Шлюзовая набережная, 10, издательство «Энергия».

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Электронно-лучевой осциллограф (ЭЛО) — весьма распространенный измерительный прибор. Для того чтобы наиболее полно использовать его возможности, необходимо правильно выбрать ЭЛО по его техническим характеристикам применительно к измерительной задаче, прочитать осциллограмму и оценить результаты измерений.

Общеизвестно, что ЭЛО дает возможность наблюдать исследуемый электрический процесс и производить измерения его параметров. Но далеко не все представляют, насколько широки измерительные возможности этого поистине универсального прибора как с его собственными измерительными устройствами — калибраторами амплитуды и длительности, так и в совокупности со вспомогательной аппаратурой. Все эти возможности мы рассмотреть не сможем и расскажем о наиболее распространенных. Знакомство с ними поможет читателю найти новые области применения ЭЛО. Поскольку принцип работы ЭЛО заключается в воздействии исследуемого напряжения на электронный луч, а в напряжения могут быть преобразованы очень многие физические процессы, то область применения этого прибора может быть значительно расширена.

Напомним читателю основную функциональную схему осциллографа (рис. 1), которая состоит из следующих узлов: электронно-лучевой трубки; канала вертикального отклонения (канала сигнала или канала *Y*); канала горизонтального отклонения (канала развертки или канала *X*); двух калибраторов — амплитуды и длительности (последний относится к каналу управления яркостью, который осуществляет модуляцию электронного луча и иногда называется каналом *Z*); питающего устройства.

Буквой *П* на рис. 1 обозначены переключатели, с помощью которых устанавливают различные режимы работы прибора.

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) служит для преобразования исследуемого напряжения в видимое изображение — осциллограмму.

Электронно-лучевая трубка снабжена общими для всех ЭЛО органами регулировки яркости и фокусировки луча и потенциометрами смещения осциллограммы по вертикали, которые на рис. 1 не показаны. Электронно-лучевая трубка подключена к схеме ЭЛО при помощи переключателей $П_2$, $П'_2$, $П_3$, $П'_3$, $П_4$.

Канал вертикального отклонения обеспечивает регулировку (усиление и ослабление) входного напряжения до уровня, необходимого для отклонения луча по вертикальной оси экрана ЭЛТ.

Канал состоит из входного устройства (вместе с гнездом

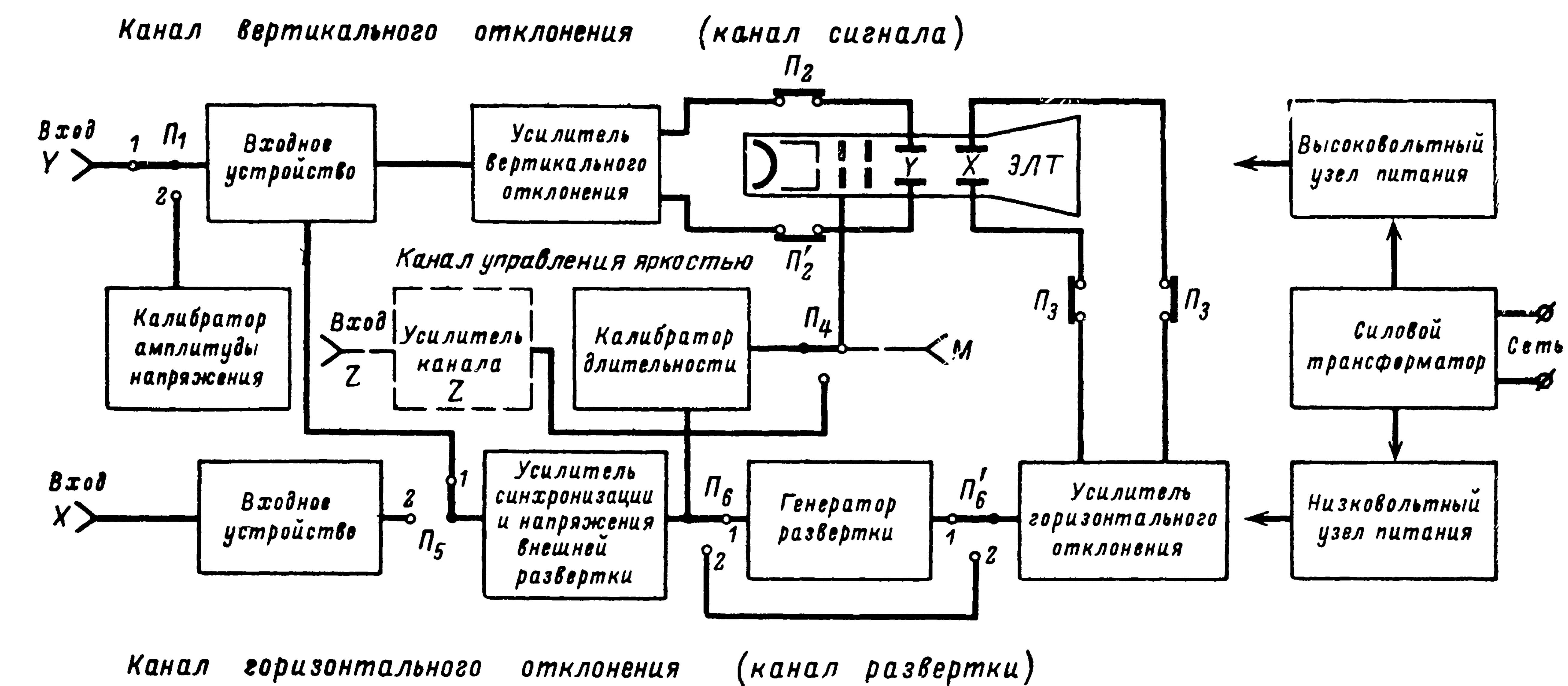


Рис. 1. Функциональная схема электронно-лучевого осциллографа.

«Вход *У*») и широкополосного усилителя напряжения, называемого обычно усилителем вертикального отклонения (УВО).

Исследуемый сигнал поступает на входное устройство, в котором он ослабляется и задерживается для того, чтобы напряжение развертки поступило на горизонтально отклоняющие пластины с некоторым опережением, что позволит наблюдать на экране ЭЛТ начало процесса. Усилитель канала обеспечивает необходимое усиление исследуемого сигнала и преобразует его из однофазного в два противофазных напряжения, которые подаются на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ.

Канал горизонтального отклонения вырабатывает развертывающее напряжение (обычно пилообразной формы), усиливает его и синхронизирует. Возможен и такой режим работы, при котором канал выполняет лишь две последние функции.

Канал состоит из входного устройства, усилителя синхронизации и напряжения внешней развертки (в ряде приборов этот узел отсутствует), генератора развертки и усилителя горизонтального отклонения.

Развертывающим напряжением может быть как пилообразное напряжение генератора развертки, так и любое другое, поданное на гнездо «Вход *X*» (в последнем случае переключатели $П_5$, $П_6$, $П'_6$ ставят в положение *2*).

Синхронизация колебаний генератора развертки может осуществляться как исследуемым сигналом (при положении переключателей, указанном на рис. 1), так и от внешнего источника, подключаемого к гнезду «Вход *X*» (при этом переключатель $П_5$ ставят в положение *2*). Можно синхронизировать колебания генератора развертки и напряжением сети.

Входное устройство и усилитель напряжения канала горизонтального отклонения по назначению аналогичны соответствующим узлам канала вертикального отклонения (кроме задержки сигнала во входном устройстве). Усилитель синхронизации и напряжения внешней развертки служит для усиления синхронизирующего напряжения и изменения его полярности в том случае, когда она не совпадает с полярностью, необходимой для запуска генератора развертки.

Генератор развертки вырабатывает пилообразное напряжение, с помощью которого исследуемый сигнал разворачивается по горизонтали (во времени).

Кроме линейной развертки в измерениях часто используют круговую и спиральную развертки.

Калибраторы ЭЛО служат для измерения амплитуды и длительности исследуемого сигнала. Канал управления яркостью (калибратор длительности) предназначен для получения масштабных меток, которые используются при измерении временных параметров сигнала.

Во многих ЭЛО гнездо «Вход *Z*» и усилитель канала *Z* отсутствуют и их заменяет калибратор длительности — генератор меток. В отдельных моделях приборов (например, ЭЛО типа С1-1) этого калибратора нет, но есть гнездо *М*, через которое на ЭЛТ можно подать напряжение, модулирующее луч по яркости.

Погрешность измерений с помощью калибраторов составляет 5—10%.

ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ БЕЗ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Методика измерения — это подробно намеченный план, который включает в себя: составление схемы, по которой предстоит проводить измерения; предварительную оценку допустимой погрешности; выбор необходимой измерительной аппаратуры, ознакомление с ее техническими возможностями и порядком измерений; собственно измерения и рассмотрение полученных результатов.

При исследовании формы напряжения важно, чтобы сам ЭЛО не вносил искажений, а это во многом зависит от правильного выбора типа прибора [Л. 1].

Выбор осциллографа в основном определяется видом сигнала. Если предстоит исследовать гармоническое колебание или какой-либо импульсный периодический сигнал небольшой скважности (не более четырех), то следует взять осциллограф с непрерывной разверткой, частота которой обеспечит наблюдение нужного числа периодов.

Если же нужно просмотреть периодическое импульсное напряжение большой скважности или однократное колебание (любой формы), то потребуется осциллограф со ждущей разверткой.

Подобрав ЭЛО по виду сигнала, следует рассмотреть его основные характеристики.

1. Величина диаметра экрана ЭЛТ, от которого зависит размер осциллограммы.

2. Чувствительность канала вертикального отклонения, выражаемая в миллиметрах на вольт, которая характеризует усиление в канале *Y* и дает представление о том, какая амплитуда сигнала получится на экране ЭЛТ, если на вход *Y* подать определенное напряжение. Чувствительность ЭЛО должна быть такой, чтобы размер изображения на экране был удобен для наблюдения.

Например, надо исследовать синусоидальный сигнал с частотой 10 кГц и амплитудой 10 мВ и мы располагаем ЭЛО типов С1-1 и С1-4 (диаметр экранов ЭЛТ у обоих приборов равен 125 мм). Чувствительность ЭЛО С1-1 равна 2,5 мм/мВ, вследствие чего получим осциллограмму с амплитудой 25 мм (размах 50 мм); на ЭЛО С1-4 (чувствительность 0,33 мм/мВ) амплитуда осциллограммы будет 3,3 мм (размах около 7 мм), следовательно, предпочтение нужно отдать прибору типа С1-1.

Кроме того, в технических характеристиках осциллографа обычно указывают чувствительность ЭЛТ при подаче сигнала непосред-

ственно на вертикально отклоняющие пластины; этим параметром в отдельных случаях также приходится пользоваться.

3. Полоса пропускания канала вертикального отклонения, характеризующая диапазон частот с определенным значением коэффициента усиления, т. е. амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Знание полосы особенно важно при исследовании несинусоидальных и импульсных сигналов, так как при неправильно выбранной АЧХ они будут искажены.

Известно, что спектр несинусоидального периодического колебания состоит из основной и ряда высших гармонических составляющих. Если полоса пропускания канала недостаточно широка, что зависит прежде всего от АЧХ усилителя, то различные составляющие спектра усиливаются неодинаково, что и вызывает отклонение формы осциллограммы от формы входного сигнала (рис. 2).

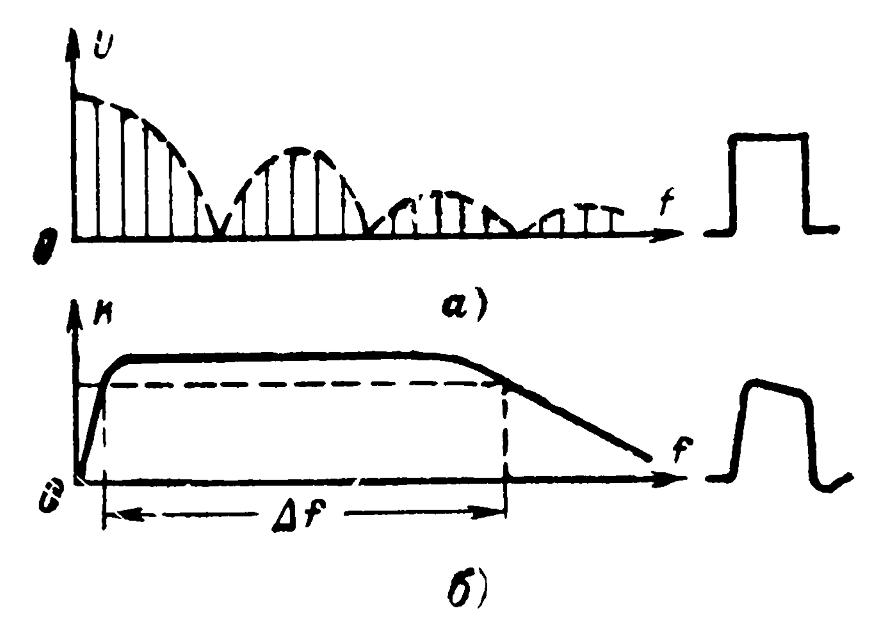


Рис. 2. Влияние полосы пропускания канала вертикального отклонения ЭЛО на форму исследуемого сигнала.

а — входной сигнал и его спектр; *б* — АЧХ канала вертикального отклонения и форма выходного сигнала.

Ширина полосы пропускания Δf (для прямоугольного импульса длительностью τ) выбирается из соотношения

$$\Delta f = (1 \div 2)/\tau.$$

Верхняя граничная частота полосы пропускания $f_в$ должна быть не менее $f_в = 0,35/\tau_{ф.а}$, иначе фронт импульса будет искажен (здесь $\tau_{ф\ а}$ — активная длительность фронта между уровнями 0,1 и 0,9 от амплитуды); напомним читателю, что $\Delta f = f_в - f_н \approx f_в$, где $f_н$ — нижняя граничная частота полосы пропускания.

4. Схема входа (открытый или закрытый), входное сопротивление и входная емкость канала *Y*. Закрытый вход (на входе канала включен конденсатор) не пропускает постоянной составляющей сигнала; большое входное сопротивление (0,5—3 МОм) и малая входная емкость (10—50 пФ) снижают влияние ЭЛО на источник сигнала.

5. Диапазон частот непрерывной развертки и диапазон длительностей ждущей развертки. Если диапазон частот непрерывной развертки ЭЛО типа С1-1 2 Гц — 50 кГц, то с его помощью можно

исследовать процессы с периодом от 0,5 с до 20 мкс. Диапазон длительностей ждущей развертки ЭЛО типа С1-5 составляет 1—3000 мкс, поэтому с его помощью можно исследовать процессы, продолжительность которых лежит в этих же пределах.

6. Цена меток калибратора длительности и пределы измерения напряжения калибратором амплитуды, а также величины их погрешностей, по которым можно оценить пределы и точность измерения соответствующих параметров сигнала.

Электронно-лучевой осциллограф подключают к источнику сигнала кабелями, входящими в его комплект. Низкочастотные процессы можно исследовать с помощью самодельных неэкранированных проводников; при этом возможно искажение осциллограммы, если частота сигнала достаточно велика или сигнал имеет импульсную форму.

Иногда для уменьшения влияния ЭЛО на источник сигнала его подключают к прибору через вспомогательный катодный повторитель, который незначительно влияет на этот источник и имеет равномерную АЧХ в широком диапазоне частот.

Некоторые типы ЭЛО имеют одно из положений переключателя входного аттенюатора, рассчитанное на подключение к прибору источника сигнала через радиочастотный коаксиальный кабель. Например, к ЭЛО типа С1-57 может быть подключен кабель с волновым сопротивлением 75 Ом, а к ЭЛО типа С1-5 — с волновым сопротивлением 50 Ом. В этом положении аттенюатора входное сопротивление ЭЛО равно волновому сопротивлению радиочастотного кабеля.

ВИЗУАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ОСЦИЛЛОГРАММ

Для правильного исследования процесса необходимо получить на экране ЭЛТ четкую и неподвижную осциллограмму. Четкость достигается регулировкой яркости и фокусировкой луча и при необходимости защитой экрана ЭЛТ от посторонних источников света с помощью тубуса. Неподвижность осциллограммы получают регулировкой частоты генератора развертки и его синхронизацией, т. е. принуждением одного генератора (в данном случае генератора развертки) работать с частотой, равной или кратной частоте другого генератора, которым может быть как источник исследуемого сигнала (внутренняя синхронизация), так и источник постороннего сигнала (внешняя синхронизация).

В отдельных типах ЭЛО, как, например, С1-5, предусмотрена синхронизация генератора развертки частотой сетевого напряжения, т. е. частотой 50 Гц, что очень удобно при исследовании процессов, частота которых кратна частоте 50 Гц.

Таким образом, для получения устойчивой осциллограммы (рис. 3) необходимо выполнение условия

$$T_р=nT_с \text{ или } f_р=(1/n)f_с, \quad n=1,\ 2,\ 3\ \ldots,$$

где $T_р$ и $T_с$ — периоды напряжения генератора развертки и исследуемого сигнала; $f_р$ и $f_с$ — соответствующие им частоты. При нарушении этого равенства, т. е. в случае, когда n не целое число, осциллограмма перемещается по экрану трубки.

Чтобы получить целое значение n, необходимо синхронизировать генератор развертки, частота которого, как правило, неста-

бильна. Поясним вкратце процесс синхронизации генератора сигналом синусоидальной формы (рис. 4). До момента t_1 генератор не синхронизировался и вырабатывал напряжение с периодом $T_р = T_1$.

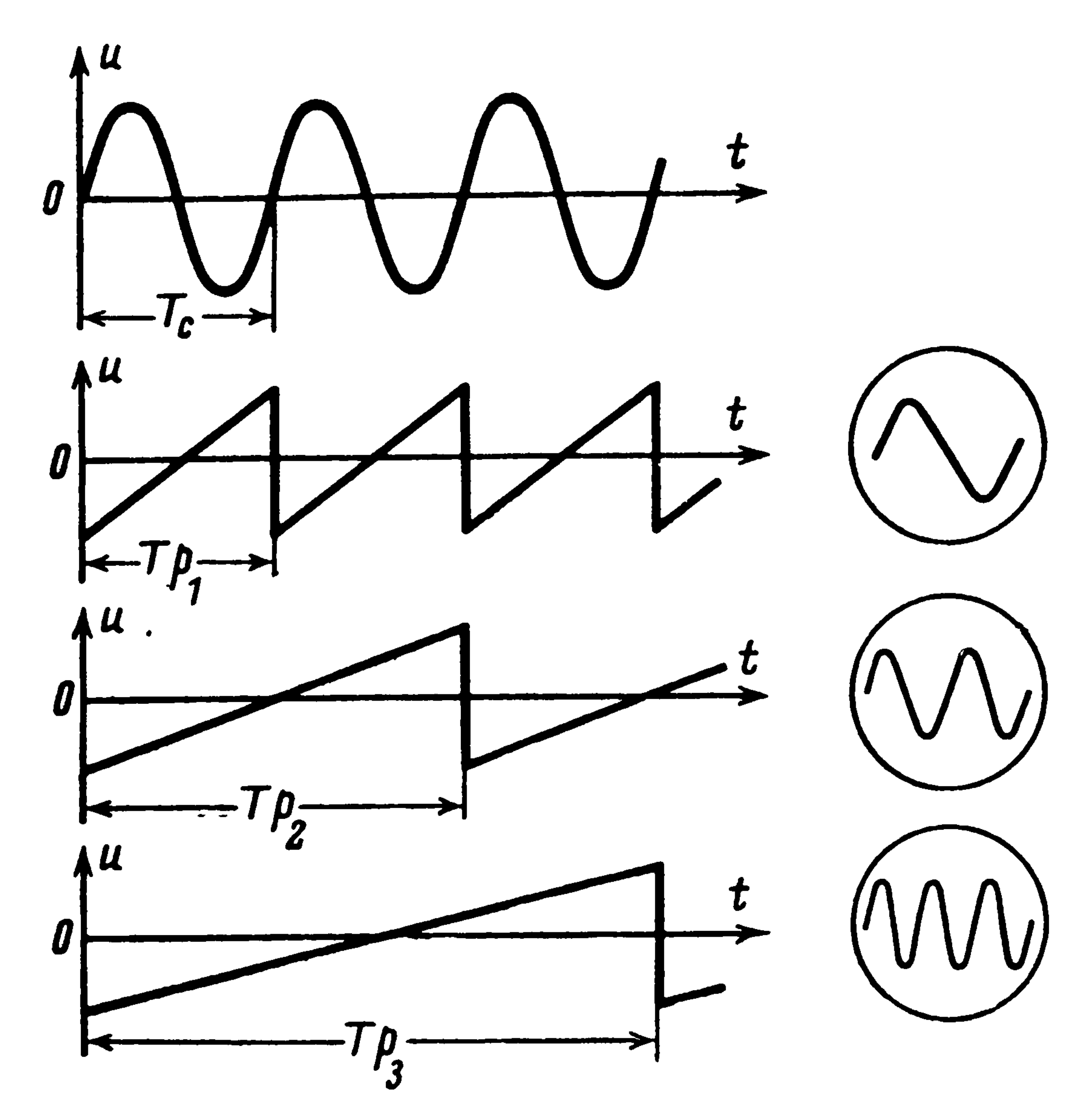


Рис. 3. Получение осциллограмм с различными периодами развертки.

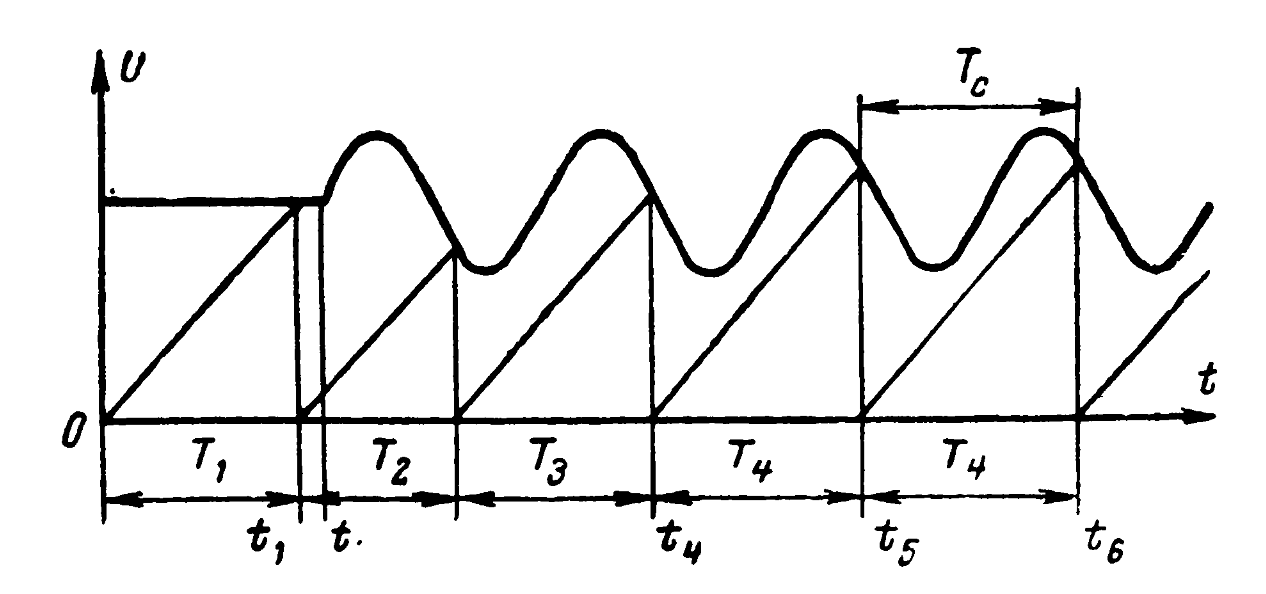


Рис. 4. Процесс синхронизации частоты генератора развертки ЭЛО.

В момент t_2 было подано синусоидальное синхронизирующее напряжение, которое изменило период напряжения развертки сначала до величины T_2, а затем до величин T_3 и T_4. Начиная с момента t_4 и далее, генератор развертки начал работать с частотой сигнала $1/T_с$.

Пояснение процесса синхронизации идеализировано, так как предполагается, что прямой ход развертки линеен, а длительность обратного хода равна нулю; однако такое упрощение на сущность рассматриваемого явления не влияет. Отметим также, что изменение периода напряжения развертки происходит при одной и той же скорости прямого хода (напряжение развертки нарастает под постоянным углом к оси времени), вследствие чего прекращение нарастания «пилы» определяется точкой, в которой соприкасаются прямой ход развертки и напряжение синхронизации.

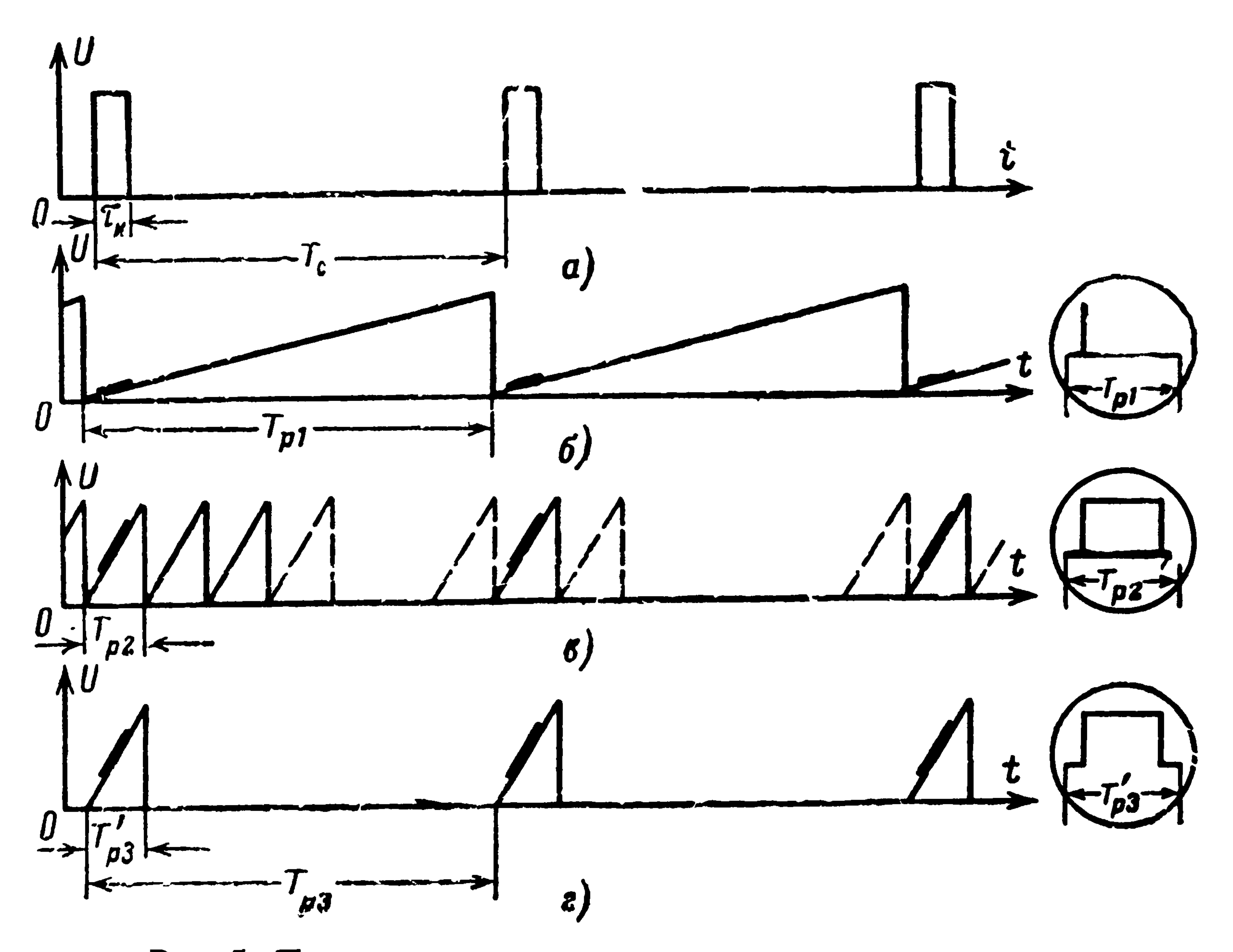


Рис. 5. Получение осциллограммы импульсного сигнала.

Для того чтобы синхронизация могла осуществляться, необходимо до наступления синхронизации обеспечить приблизительное равенство $T_р \approx T_с$. Получению устойчивой осциллограммы способствует и регулировка амплитуды синхронизирующего напряжения.

Непрерывную развертку используют преимущественно для исследования гармонических сигналов. При исследовании коротких импульсных сигналов развертывающее напряжение должно быть «ждущим», т. е. вырабатываться под воздействием исследуемого сигнала. Непрерывную развертку в этом случае применять нельзя (рис. 5,*а*) [Л. 1, 2].

Действительно, для изучения формы импульсного сигнала необходимо, чтобы его осциллограмма занимала бо́льшую часть экрана ЭЛТ. Однако довольно часто длительность импульса $\tau_и$ в несколько десятков раз меньше периода $T_с$, поэтому при $T_{р1}=T_с$ (рис. 5,*б*) осциллограмма импульса занимает незначительную часть

развертки и будет выглядеть на экране ЭЛТ очень узкой вертикальной чертой.

Если уменьшить период развертки так, чтобы большая часть периода приходилась на длительность сигнала $\tau_и$ (рис. 5,*в*), то импульс на экране будет виден гораздо лучше. Но этот режим также не годится для исследования импульсных сигналов, так как из нескольких десятков периодов развертки только один даст изображение импульса на экране ЭЛТ, а остальные бесполезно прочерчивают горизонтальную линию, вследствие чего форма импульса будет видна плохо. И лишь ждущий режим работы генератора (рис. 5,*г*) обеспечивает необходимые условия для изучения формы сигнала, так как для его развертки используется лишь полезная часть периода $T_{рз}$, равная интервалу $T'_{рз}$.

Некоторые ЭЛО во входном устройстве канала *Y* имеют линию задержки, что позволяет исследовать фронт импульса, поскольку он при этом задерживается относительно начала развертки (рис. 5).

Для тщательного изучения формы фронта импульсного сигнала период развертки можно подобрать таким, чтобы на всем экране ЭЛТ воспроизвести лишь начальную часть импульса (рис. 6).

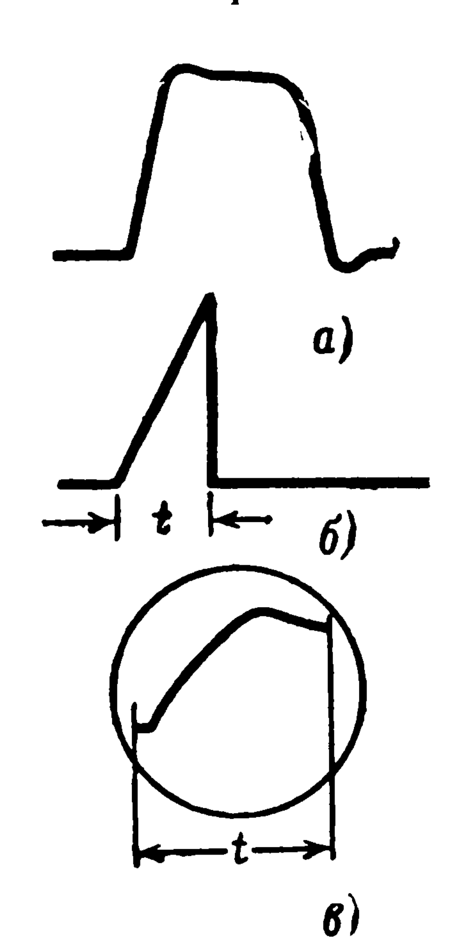


Рис. 6. Исследование фронта импульсного сигнала

а — исследуемый сигнал; *б* — пилообразный импульс ждущей развертки; *в* — полученная осциллограмма.

При измерениях с помощью ЭЛО могут произойти искажения осциллограмм, причины которых необходимо знать. Основные из них следующие (рис. 7) [Л. 1, 4].

1. На экране ЭЛТ наблюдается несимметричная синусоида (рис. 7,*а*), хотя на вход ЭЛО подан гармонический сигнал. Это происходит из-за большой протяженности обратного хода развертки. Такое искажение устраняется увеличением длительности периода развертки в 2—3 раза. При этом на экранах наблюдаются 2—3 периода исследуемого сигнала и искажается лишь последний период осциллограммы.

2. Расфокусировка луча ЭЛТ — линия, вычерчивающая осциллограмму, выражена нерезко. Это может быть обусловлено нестабильностью источника питания ЭЛТ, исправность которого необходимо проверить.

3. Огибающая изображения сигнала дугообразно изогнута (рис. 7,*б*) — в усилителе вертикального отклонения появился фон сетевого напряжения, т. е. фон частотой 50 Гц.

4. Не наблюдается фронт импульса (рис. 7,*в*): напряжения развертки и сигнала поступают на пластины ЭЛТ одновременно (сравните с рис. 5). Нужно взять ЭЛО с задержкой входного сигнала.

5. Фронт и спад прямоугольного импульса получаются слишком пологими (рис. 7,*г*). Причина этого — недостаточно широкая полоса пропускания канала вертикального отклонения. Необходимо использовать другой ЭЛО с более широкой полосой пропускания.

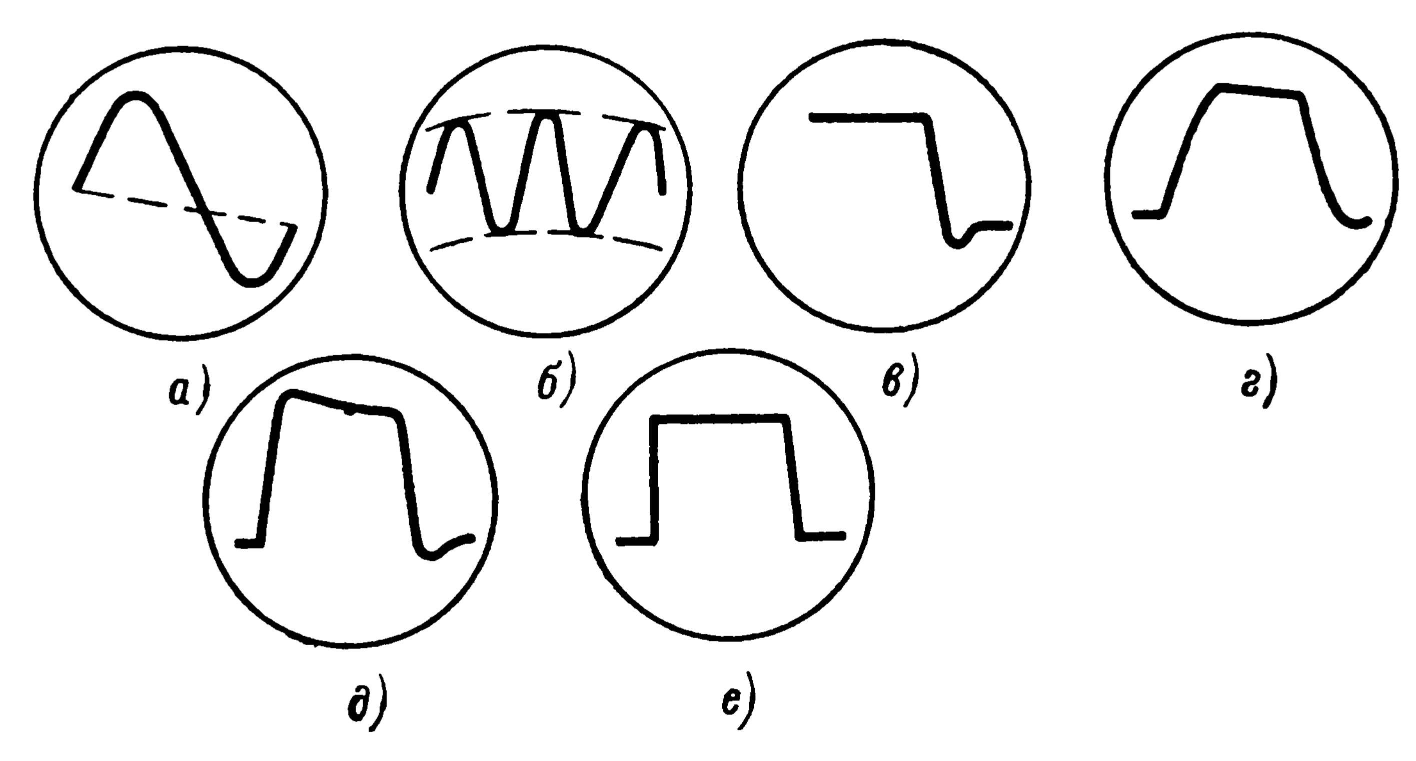


Рис. 7. Искажения сигналов, вносимые ЭЛО.

6. Вершина импульса скошена (рис. 7,*д*). Это искажение происходит потому, что канал *Y* не пропускает или недостаточно усиливает низкочастотные составляющие спектра сигнала. Такие искажения наиболее часто происходят при исследовании импульсов большой длительности. В этом случае нужно применить ЭЛО, не вносящий таких искажений, например осциллограф типа С1-4.

7. Осциллограмма импульса имеет неестественно ровную вершину (рис. 7,*е*). Причиной этого может быть ограничение в канале вертикального отклонения из-за большого уровня входного сигнала. Уменьшив этот уровень, ограничение можно устранить.

При исследовании однократных или редко повторяющихся процессов, а также сигналов, для развертки которых необходима низкая частота генератора развертки (5—10 Гц), необходимо выбирать ЭЛТ с длительным послесвечением, так как на экране обычной ЭЛТ осциллограмма будет мерцать. Иногда для регистрации осциллограмм таких процессов используют фотоаппарат.

ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУД И МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ СИГНАЛОВ

Смещение светящегося пятна на экране ЭЛТ пропорционально ее чувствительности, величине напряжения измеряемого сигнала и коэффициенту усиления в канале осциллографа. Сказанное спра-

ведливо для обоих каналов прибора, но поскольку исследуемый сигнал подается в канал Y, в дальнейшем речь будет идти только об этом канале.

Между вертикальными размерами осциллограммы, величиной входного сигнала и чувствительностью ЭЛО существует зависимость

$$l = uh_y,$$

где l — размер осциллограммы по вертикали, мм; u — мгновенное значение напряжения входного сигнала, В; h_y — чувствительность канала, мм/В.

Чтобы измерить напряжение входного синусоидального сигнала (рис. 8), надо определить $l = 2U_{макс}$ по масштабной сетке и вычислить величину входного сигнала $U_{макс}$ по указанному в технических характеристиках осциллографа значению h_y или заменить исследуемый сигнал калиброванным напряжением, отклоняющим электронный луч на ту же высоту l, т. е. сравнить измеряемое напряжение с образцовым.

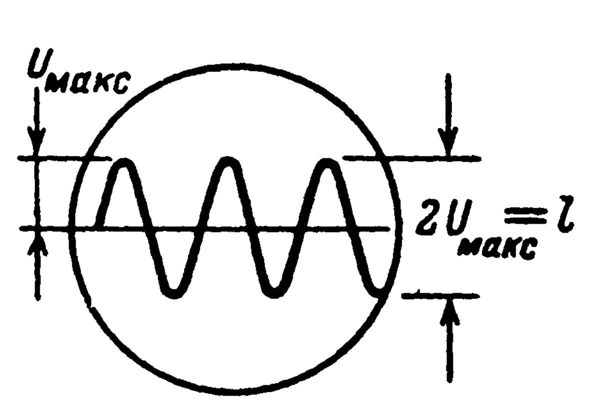


Рис. 8. Осциллограмма гармонического сигнала.

Рассмотрим пример измерения напряжения гармонического сигнала с помощью ЭЛО типа С1-1, который имеет чувствительность канала $h_y = 2{,}5$ мм/мВ, а аттенюатор входного устройства установлен на ослабление входного сигнала в 10 раз; положим, что размер осциллограммы при этом $l = 50$ мм.

Из вышеприведенного соотношения имеем:

$$u = l/h_y = 50/2{,}5 = 20 \text{ мВ}.$$

Поскольку входной сигнал был ослаблен в 10 раз, то результат нужно увеличить в 10 раз, т. е. $u = 2U_{макс} = 200$ мВ.

Амплитуда исследуемого напряжения будет $U_{макс} = 100$ мВ, а его действующее значение $U = U_{макс}/\sqrt{2} = 70{,}7$ мВ.

С учетом сказанного выражения для вычисления амплитудного и действующего значений примут вид:

$$U_{макс} = \frac{l}{2h_yK}; \quad U = \frac{l}{2\sqrt{2}h_yK},$$

где K — коэффициент ослабления аттенюатора ЭЛО.

Необходимо обращать внимание на размерность величины h_y, так как она в разных описаниях указывается в сантиметрах на вольт, миллиметрах на вольт, вольтах на миллиметр, миллиметрах на милливольт.

Этот метод измерения применим и для определения *мгновенного* значения напряжения. При этом исследуемую осциллограмму нужно разместить симметрично относительно оси абсцисс и отсчитывать от нее мгновенное значение сигнала; уменьшать отсчет в два раза нет необходимости.

Рассмотрим измерение напряжения при подаче исследуемого сигнала на отклоняющие пластины ЭЛТ помимо усилителя канала

ЭЛО. Подача сигнала должна осуществляться через разделительные конденсаторы большой емкости, чтобы избежать подключения одной из пластин ЭЛТ к корпусу через источник исследуемого сигнала.

Поскольку чувствительность ЭЛТ невелика (около нескольких десятых долей миллиметра на вольт), то измеряемый сигнал должен быть достаточно большим — сотни вольт.

Максимальное напряжение, которое можно измерить в этом случае, используя ЭЛО типа С1-5 (или ЭЛО ЭО-6М), в котором установлена ЭЛТ типа 8ЛО29 (рабочий диаметр $d=70$ мм, чувствительность вертикально отклоняющих пластин $h_y=0{,}23$ мм/В), будет равно:

$$U_{\text{макс}} = \frac{d}{2h_y} = \frac{70}{2 \cdot 0{,}23} \approx 150 \text{ В}$$

Во многих ЭЛО имеется калибратор амплитуды, работающий на принципе сравнения напряжений и исключающий применение вышеописанной процедуры. Метод измерения напряжений с помощью калибратора состоит в следующем.

В положении *1* переключателя $П_1$ (рис. 1) на ЭЛО подается исследуемый сигнал и на экране ЭЛТ отмечается размер осциллограммы l. Затем переключатель ставят в положение *2* и, не изменяя усиление канала, на ЭЛТ подают регулируемое и известное по величине напряжение калибратора, которое отклоняет луч на ту же величину l. Это напряжение считывается либо по градуированному в вольтах потенциометру калибратора, либо по встроенному в калибратор вольтметру.

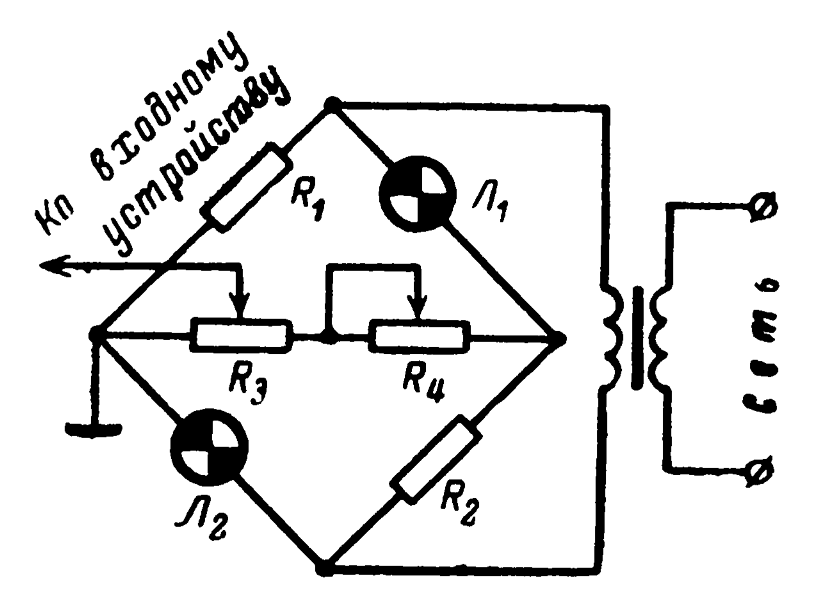


Рис. 9. Схема калибратора амплитуды ЭЛО.

Один из вариантов схемы калибратора амплитуды, используемых в ЭЛО типов С1-5 и ЭО-6М, работает на основе мостовой схемы (рис. 9). К одной диагонали моста приложено напряжение сети, а со второй снимается напряжение, калиброванное по величине. В противоположные плечи моста включены резисторы R_1 и R_2 и лампочки от карманного фонаря $Л_1$ и $Л_2$, представляющие собой нелинейные сопротивления, которые стабилизируют калиброванное напряжение. Благодаря им изменения напряжения сети на ±10% незначительно сказываются на выходном напряжении калибратора ±(1—2)%. Потенциометр R_4 служит для подбора сопротивления этой диагонали, а с потенциометра R_3 и корпуса калиброванный сигнал подается на вход усилителя канала вертикального отклонения (на входное устройство).

Измерять напряжение сигнала можно, калибруя масштабную сетку ЭЛО, т. е. определяя цену деления сетки в вольтах на миллиметр. В этом случае сама сетка становится шкалой, по которой можно измерять напряжение. Таким способом измеряют величину сигнала в осциллографе типа С1-4 (ЭНО-1): на вход Y подают напряжение с выхода калибратора амплитуды, затем регулируют усиление канала Y так, чтобы луч на экране ЭЛТ

отклонился на удобное для измерений деление шкалы. После этого напряжение калибратора отключают и, не трогая ручек регулировки канала Y, подают исследуемый сигнал, напряжение которого отсчитывают непосредственно по масштабной сетке.

Последовательность импульсов одной полярности содержит постоянную составляющую U_0 (рис. 10,*а*), которая не попадает на вход усилителя, если ЭЛО имеет закрытую схему входа. Тем не менее на экране ЭЛТ наблюдается полная амплитуда исследуемого сигнала (рис. 10,*б*).

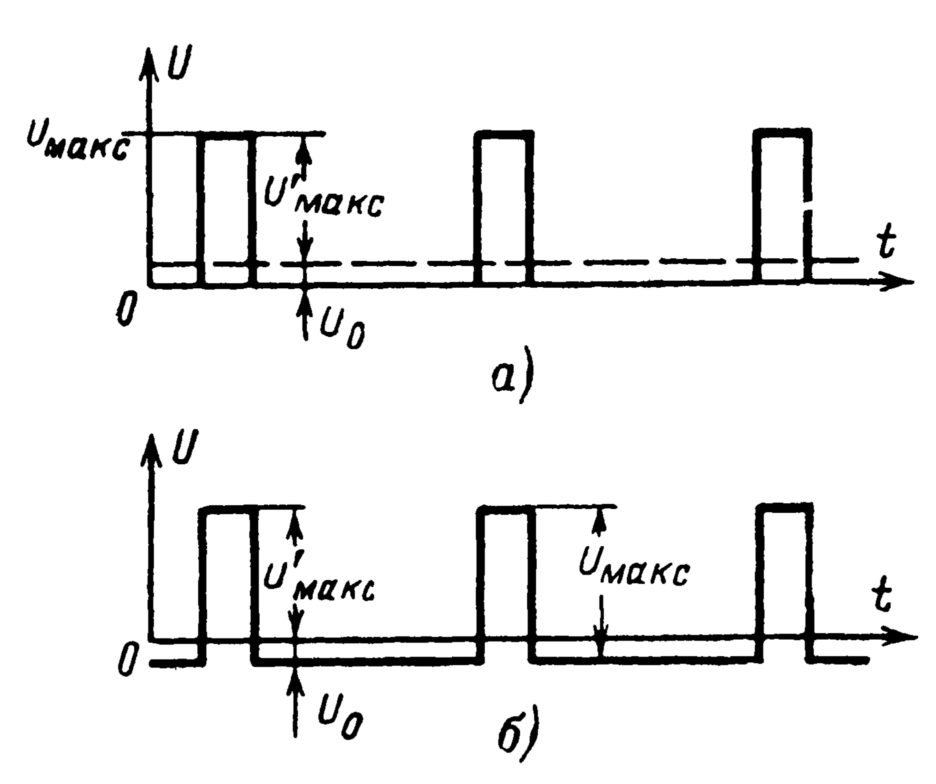


Рис. 10. Исследование сигнала с постоянной составляющей.

а — сигнал на входе ЭЛО; *б* — сигнал на ЭЛТ.

Ко входной цепи ЭЛО с закрытым входом (рис. 11) подключен генератор исследуемого сигнала, который можно представить в виде двух источников — переменного напряжения $U'_{\text{макс}}$ и постоянного напряжения U_0. Источник постоянного напряжения заряжает конденсатор C до напряжения U_0 противоположной полярности, вследствие чего постоянная составляющая измеряемого напряжения будет скомпенсирована. В результате этого импульсный сигнал (рис. 10,*а*) на экране ЭЛТ примет вид, указанный на рис. 10,*б*, т. е. превратится в сигнал без постоянной составляющей.

Если же до подачи исследуемого сигнала линию развертки установить на уровне диаметра ЭЛТ, то величину постоянной составляющей можно определить, измерив по масштабной сетке смещение осциллограммы, равное величине U_0, и переведя его в вольты расчетным путем или с помощью калибратора.

Известно, что соотношение $U_{\text{макс}} = \sqrt{2}U$, где U — действующее значение, справедливо лишь для сигналов синусоидальной формы. Однако, используя калибратор напряжения ЭЛО, можно измерять по одной и той же шкале как гармонические, так и импульсные напряжения. Объяснить это можно, рассмотрев рис. 12. Очевидно, что амплитуда импульса равна удвоенной амплитуде гармонического сигнала $U'_{\text{макс}}$. Градуируя шкалу калибратора в амплитудных значениях синусоидального напряжения, по этой же шкале можно отсчитывать и амплитудное значение сигналов несинусоидальной формы. Если же получен отсчет по шкале, отградуированной в действующих значениях U, то амплитуду негармонического сигнала $U_{\text{макс}}$ можно найти из соотношения

$$U_{\text{макс}} = 2U'_{\text{макс}} = 2\sqrt{2}U.$$

При всей наглядности и простоте измерения напряжений с помощью калибратора, пользуясь им, следует помнить, что погрешность измерения относительно велика ($\pm 10\%$). Причин к тому мно-

го: параллакс, происходящий из-за того, что экран ЭЛТ и масштабная сетка расположены в разных плоскостях, смещение масштабной сетки относительно ЭЛТ, неточность номиналов элементов схемы

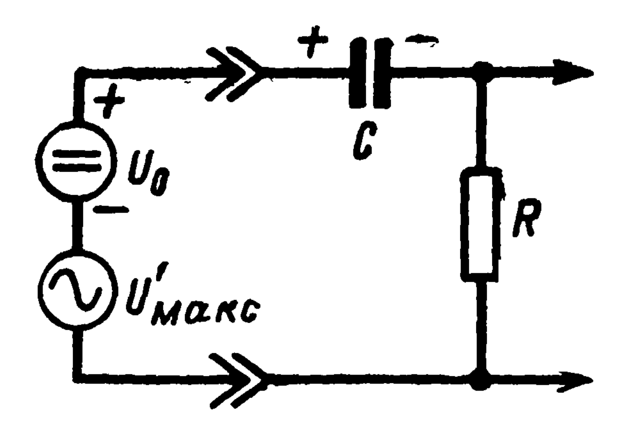


Рис. 11. Эквивалентная схема генератора импульсного напряжения, подключенного ко входу ЭЛО.

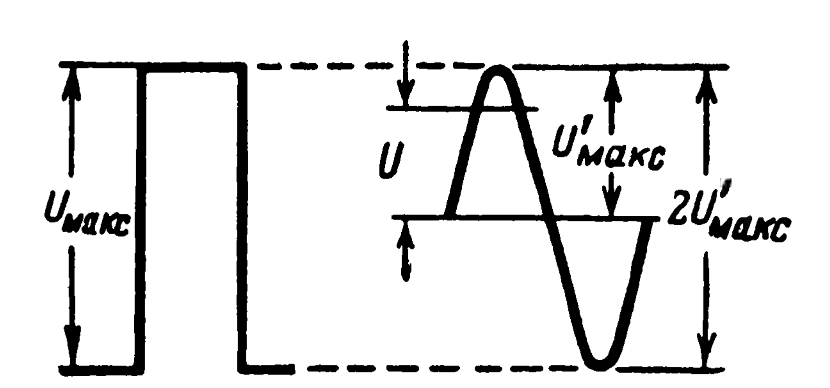


Рис. 12. Сопоставление амплитуд гармонического и прямоугольных напряжений.

входного делителя и потенциометров самого калибратора, конечный размер пятна электронного луча на экране ЭЛТ, кривизна экрана ЭЛТ и ряда других.

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ

Для измерения временных параметров сигналов (длительности импульсов, их фронтов и спадов, периода следования и других) обычно используют специальные метки, которые можно получить, модулируя электронный луч ЭЛТ по яркости гармоническим сигналом или сигналом прямоугольной формы.

В ряде последних моделей ЭЛО развертывающее напряжение откалибровано по времени с указанием на передней панели прибора масштаба измерения в микросекундах на сантиметр или миллисекундах на сантиметр. Таким образом при установке переключателя развертки в определенное положение будет известен временной интервал, на котором наблюдается осциллограмма.

Рассмотрим процесс модуляции яркости луча гармоническим сигналом при измерении длительности импульса (рис. 13,*а*). В момент t_1 (рис. 13,*б*) на модулятор ЭЛТ подают гармонический сигнал определенной частоты с амплитудой, достаточной для запирания электронного луча; здесь $u_к$ и $u_{мод}$ — напряжения на катоде и модуляторе ЭЛТ, U — разность потенциалов, обеспечивающая нормальное свечение осциллограммы, T — период модулирующего сигнала.

При положительной полуволне модулирующего сигнала (промежуток времени t_1—t_2) напряжение модулятора возрастает, количество электронов (величина тока), вылетающих из катода, увеличивается и осциллограмма светится ярче. При отрицательной полуволне модулирующего сигнала (промежуток времени t_2—t_3) напряжение на модуляторе снижается настолько, что движение электронов от катода к экрану ЭЛТ прекращается (луч будет заперт) и свечение исчезает. В результате осциллограмма импульсного сигнала будет изображена пунктирной линией (рис. 13,*в*). Здесь

$U_{макс}$ — амплитуда импульсного напряжения; $\tau_и$ — длительность импульса на уровне $0{,}5U_{макс}$; $\tau_ф$ и $\tau_{сп}$ — длительности фронта и спада, измеренные между основанием импульса и уровнем $0{,}9U_{макс}$; $\tau'_и$ — длительность импульса на уровне $0{,}1U_{макс}$.

Поскольку частота модулирующего напряжения известна, то из соотношения $f=1/T$ можно легко установить и единицу измерения времени, т. е. определить цену метки — временной интервал $T=t_3-t_1$. Например, если частота модулирующего сигнала f = 1 МГц, то период T (или цена одной метки) равен одной микросекунде.

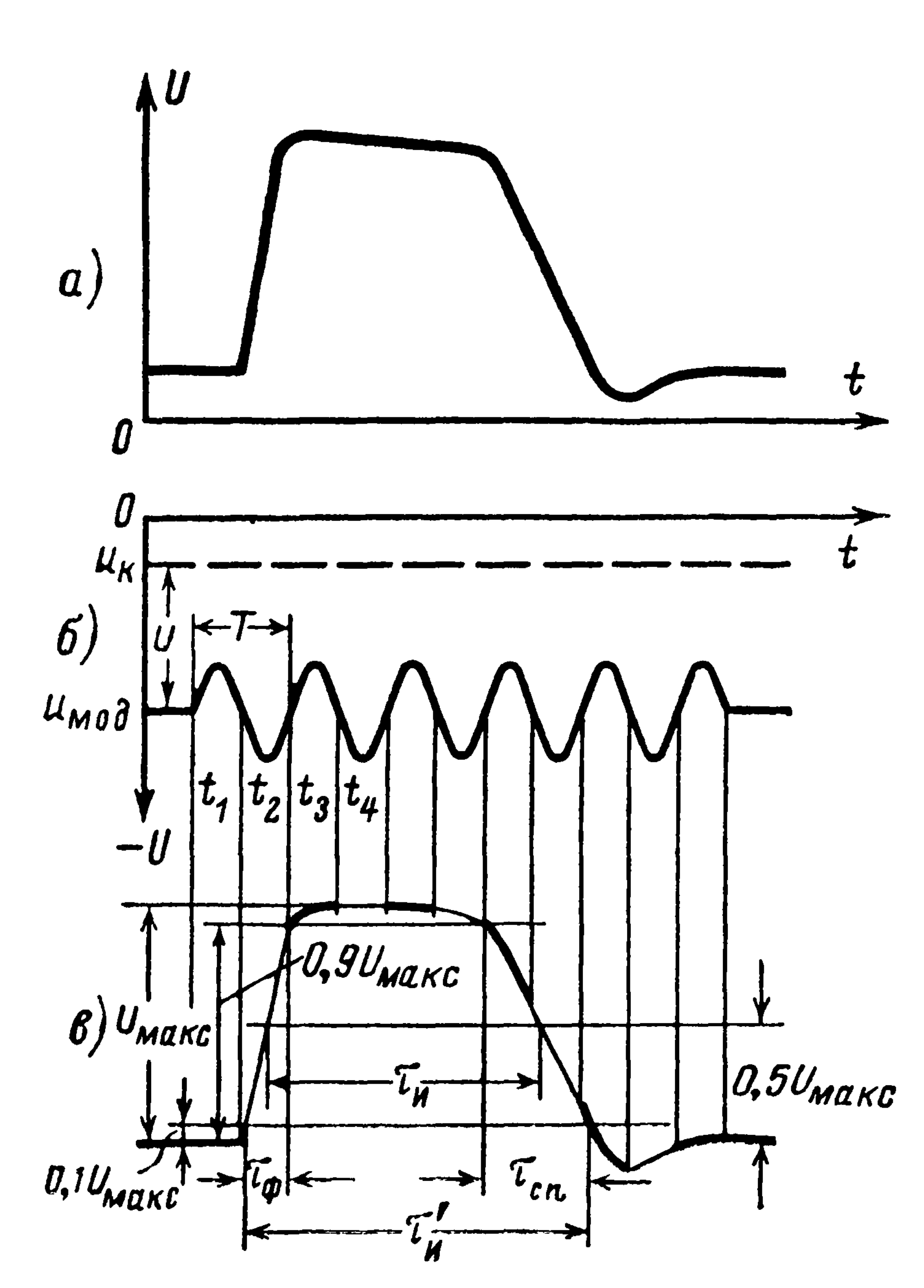


Рис. 13. Получение меток длительности.

а — исследуемый сигнал; *б* — сигнал калибратора длительности, поданный на модулятор ЭЛТ; *в* — осциллограмма сигнала с метками.

Такую же пунктирную осциллограмму можно получить, если модулирующее напряжение подать на катод ЭЛТ. Разница будет состоять лишь в том, что положительная полуволна даст темную часть метки, а отрицательная—светлую Пунктирную осциллограмму можно получить и в том случае, если модулирующий сигнал будет иметь форму прямоугольных импульсов типа «меандр».

В схемах ЭЛО модулирующее напряжение вырабатывают с помощью калибраторов длительности, в которых основным узлом является генератор гармонических колебаний с контуром ударного возбуждения или цепочкой RC. Первый тип калибратора (рис. 14) распространен больше, поэтому вкратце рассмотрим его работу.

В катодную цепь лампы $Л_1$ включен колебательный контур (на рис. 14 показан один контур, хотя их число может быть любое). Лампа $Л_1$ нормально открыта, через нее и катушку L_2 течет катодный ток i_0, колебания в контуре отсутствуют. Как только включается генератор ждущей развертки, на сетку лампы $Л_1$ поступает запирающий импульс отрицательной полярности. Катодный ток резко прекращается, и в контуре возникают гармонические колебания, частота которых определяется параметрами контура. Время существования этих колебаний τ определяется длительностью запирающего импульса. Как только этот импульс закончится, лампа $Л_1$ вновь откроется и колебания в контуре прекратятся из-за того, что в катодной цепи лампы $Л_1$ возникнет напряжение отрицательной

обратной связи, действие которой равнозначно шунтированию контура эквивалентным сопротивлением $R=1/S$, где S — крутизна лампы. Таким образом лампа $Л_1$ выполняет роль электронного ключа, вызывающего и прекращающего колебания в контуре.

Лампа $Л_2$ способствует тому, чтобы генерируемые колебания в течение времени τ не затухали. К ее сетке приложено напряжение, изменяющееся синфазно с напряжением в контуре и с напряжением между точками *АБ* катушки индуктивности, т. е. обеспечивается положительная обратная связь. Поддержанию постоянства

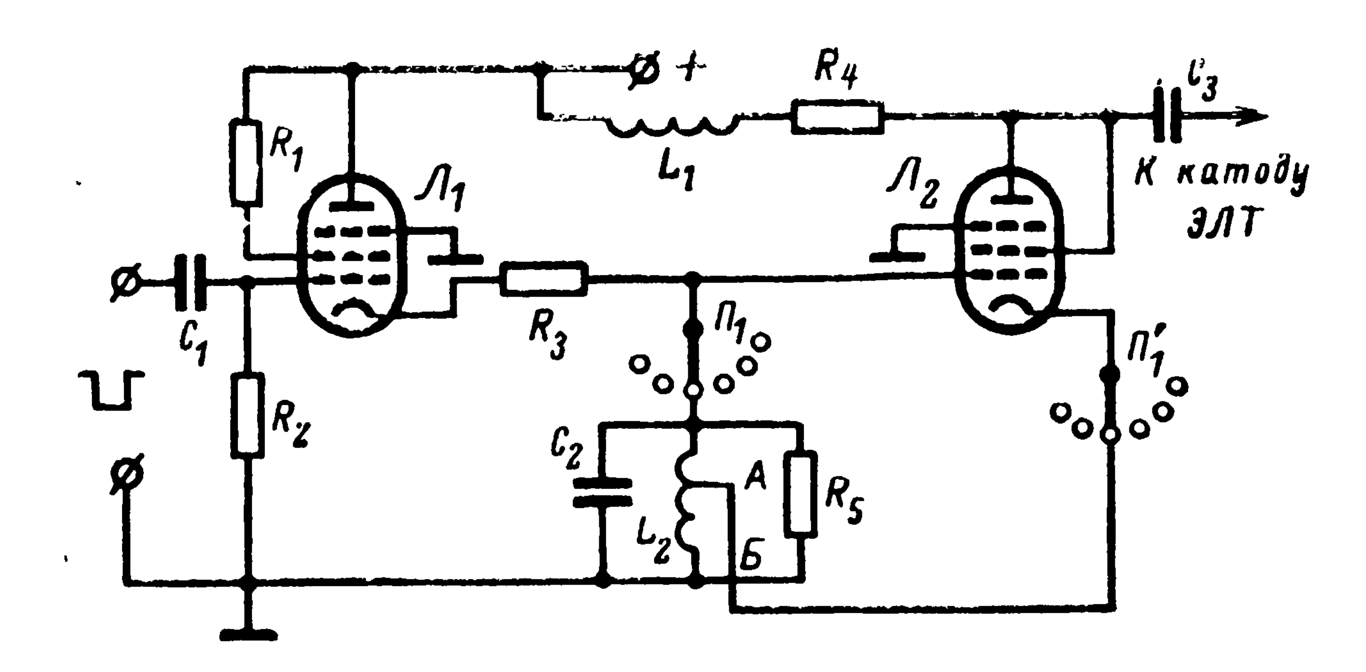


Рис. 14. Принципиальная схема генератора меток.

амплитуды колебаний способствует и низкая добротность контура, зашунтированного резистором R_5. Усиленные лампой $Л_2$ колебания подаются на модулятор или катод ЭЛТ, вызывая модуляцию луча по яркости.

В некоторых типах ЭЛО есть самостоятельный канал Z (канал управления яркостью), который служит для калибровки длительности с помощью внешнего источника переменного напряжения. После усиления в канале Z это напряжение подается на модулятор или катод ЭЛТ. Такой канал имеется, например, в ЭЛО типа С1-3 (ИО-4).

В некоторых осциллографах (С1-1, С1-54) калибратора длительности нет и калибровочное напряжение подается от внешнего источника непосредственно на модулятор ЭЛТ (см. рис. 1).

Калибратором длительности можно измерить период гармонического сигнала, длительность фронта и спада импульсов и период их следования. У некоторых типов ЭЛО калибратор длительности работает лишь при включении генератора развертки в ждущий режим.

Измерение временных характеристик периодических сигналов производится так: включив калибратор длительности и выбрав оптимальную цену меток, достаточно удобную для подсчета и обеспечивающую надлежащую точность измерения, считают их число, приходящееся на измеряемый временной интервал.

Чтобы правильно оценить результат измерений, надо знать источники погрешностей, которые прежде всего зависят от выбора цены метки и правильности определения границ измеряемых участков сигнала. Подсчет числа меток должен производиться тща-

тельно, для чего необходимо хорошо сфокусировать луч и подобрать нужную яркость свечения осциллограммы. Точность измерения зависит и от самого калибратора, т. е. от нестабильности частоты генерируемых им колебаний. Суммарная погрешность измерения длительности достигает $\pm 10\%$.

Неисправность или отсутствие калибратора длительности не исключают возможности измерения временных интервалов: можно воспользоваться развертывающим напряжением, производя измерения с помощью масштабной сетки с миллиметровыми делениями. В этом случае генератор развертки работает в непрерывном режиме с частотой $f_р$, на экране ЭЛТ получают горизонтальную линию и, регулируя усиление канала горизонтального отклонения, устанавливают ее равной какому-либо числу делений масштабной сетки $l_р$. Например, при $f_р=5$ кГц, $l_р=50$ мм период развертки равен:

$$T_р=1/f_р=1/5\cdot 10^3=0{,}2 \text{ мс}=200 \text{ мкс},$$

а цена деления масштабной сетки Δl составит:

$$\Delta l=T_р/l_р=200/50=4 \text{ мкс/мм}.$$

Теперь, не меняя регулировок развертки, на ЭЛО подают исследуемый сигнал и, пользуясь полученным масштабом, находят его временные **параметры.**

Рассмотренный способ измерения имеет погрешность, обусловленную конечной длительностью обратного хода напряжения развертки. Дело в том, что полученная на ЭЛТ горизонтальная линия пропорциональна протяженности прямого хода «пилы», которая меньше периода на длительность обратного хода, примерно равного 10—15% периода. Поэтому и погрешность измерения временного интервала будет иметь такое же значение.

Если в разобранном примере положить, что время обратного хода составляет 10% периода, то цена деления масштабной метки будет иной:

$$\Delta l=t_{пр}/l_р=180/50=3{,}6 \text{ мкс/мм},$$

где $t_{пр}$ — время прямого хода (90% $T_р$), равное 180 мкс.

Очевидно, что погрешность измерения временного интервала составляет 10%.

Применить этот метод при работе генератора развертки в ждущем режиме удается не всегда, так как длина линии развертки может превысить диаметр экрана ЭЛТ, что исключает измерение величины $l_р$. Если же $l_р$ можно получить в пределах экрана, то масштабную сетку калибруют по известной скорости ждущей развертки.

Погрешность измерения в этом случае определяется точностью градуировки масштабной сетки и правильностью ее установки, погрешностью отсчета числа делений, ошибкой в скорости развертки. Общая погрешность измерения может достигать $\pm 10\%$.

В некоторых ЭЛО, работающих в низкочастотных диапазонах (например, С1-16, С1-17, С1-18 и др.), применяется совмещенный калибратор амплитуды и длительности. В качестве калибрационного сигнала в них обычно используется сетевое напряжение с частотой 50 Гц, которое преобразуется в прямоугольное напряжение с периодом 0,02 с. С помощью прецизионных делителей величина этого напряжения доводится до нескольких калиброванных значе-

ний, с которыми сравнивают исследуемое напряжение по величине. Будучи поданным на модулятор или катод ЭЛТ, это же напряжение позволит найти и длительность сигнала

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОСЦИЛЛОГРАФА

Без каких-либо вспомогательных устройств ЭЛО можно применить для измерения некоторых параметров электрических сигналов. Наиболее часто осциллограф используют в следующих случаях.

Измерение коэффициента амплитудной модуляции. Как известно, коэффициент амплитудной модуляции m определяется соотношением

$$m = \frac{A - Б}{A + Б} 100\%,$$

где A и $Б$ — соответственно максимальное и минимальное значение модулированного сигнала (рис. 15).

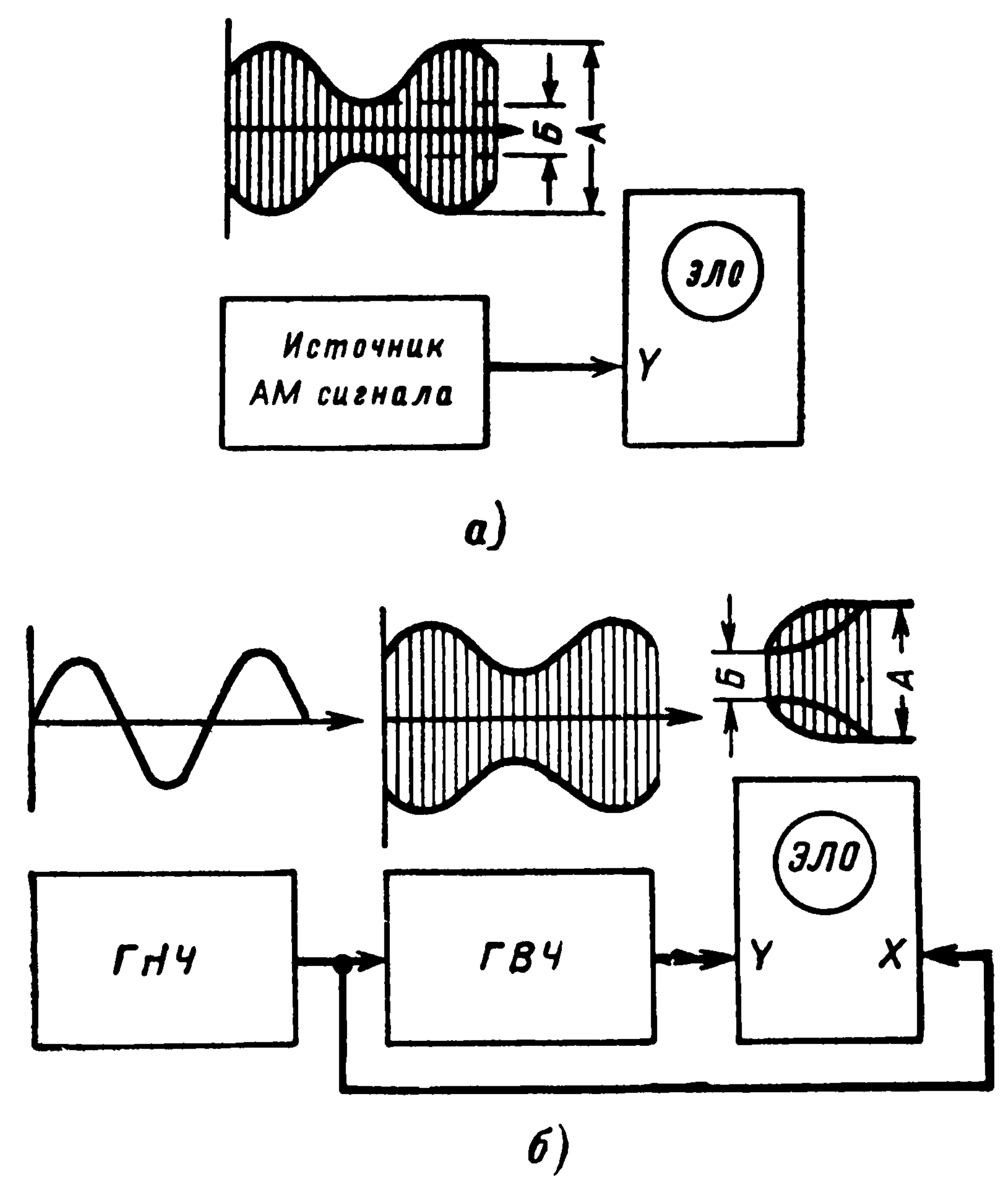


Рис. 15. Измерение глубины амплитудной модуляции.

В зависимости от исследуемого устройства блок-схемы измерения будут различными. На рис. 15,*а* изображена блок-схема для случая, когда источником амплитудно-модулированного сигнала является генератор со встроенным модулятором. Отсчитав значения A и $Б$ по масштабной сетке ЭЛО, находят величину m.

Если колебания генератора высокой частоты (ГВЧ) модулируют напряжением генератора низкой частоты (ГНЧ), то коэффициент амплитудной модуляции можно измерять либо так же, как

и в предыдущем случае, либо по блок-схеме, изображенной на рис. 15,*б*. Здесь напряжение ГНЧ подают на вход *X*, а напряжение ГВЧ — на вход *Y* ЭЛО, причем генератор развертки выключают. При этом на экране ЭЛТ будет видна осциллограмма фигуры трапецеидальной формы (развертывающим напряжением является усиленный каналом развертки сигнал ГНЧ). Для этого измерения переключатели $П_5$ и $П_6$ на рис. 1 нужно поставить в положение *2*.

Обычно верхняя и нижняя стороны фигуры имеют форму эллипсов, что объясняется взаимодействием огибающих промодулированного колебания и модулирующего, которые имеют некоторый фазовый сдвиг. Значения *А* и *Б*, подставляемые в формулу для вычисления коэффициента *m*, должны соответствовать максимальному и минимальному расстояниям между эллипсами.

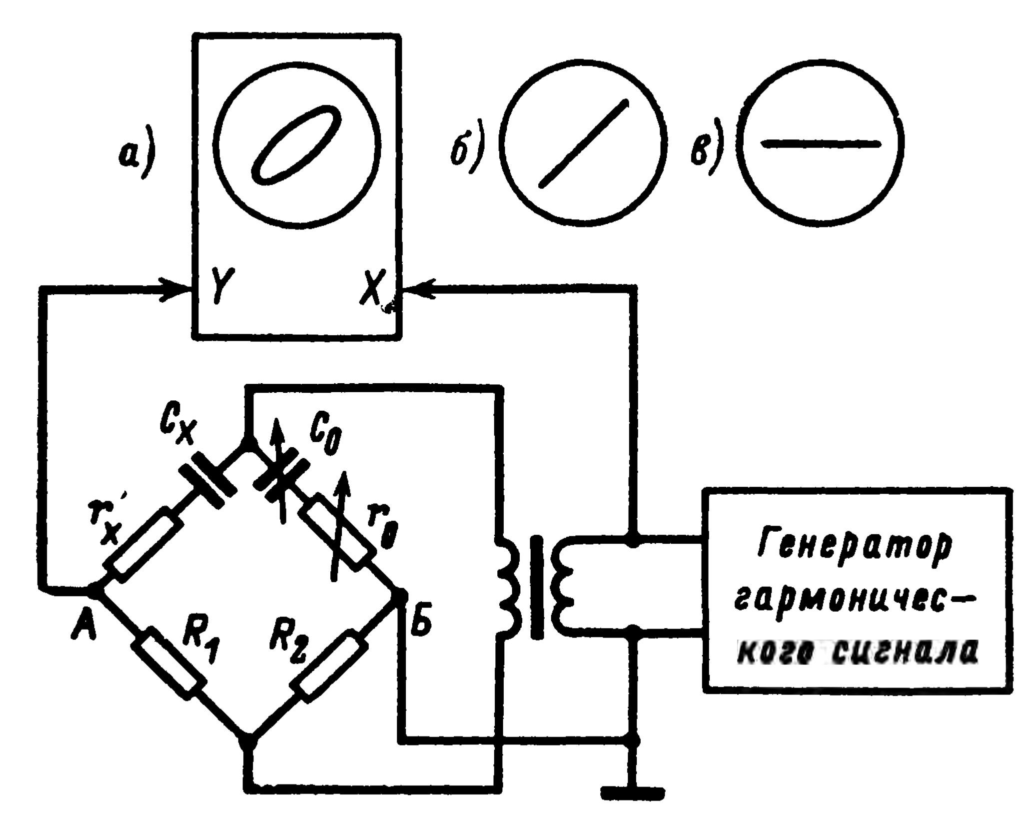


Рис. 16. Измерение емкости с помощью ЭЛО.

Погрешность измерения коэффициента амплитудной модуляции определяется четкостью фокусировки осциллограммы и правильностью отсчетов значений *А* и *Б*. В обоих случаях ошибка примерно одинакова и составляет около ±5%.

Осциллограф в качестве индикатора баланса мостовой схемы. Для измерения сопротивлений, индуктивностей и емкостей применяют уравновешенные мосты переменого тока, в которых индикаторами равновесия (баланса) моста являются чувствительные микроамперметры. В качестве такого индикатора можно использовать и осциллограф.

Рассмотрим применение ЭЛО в мостовой схеме, используемой для измерения емкости конденсатора (рис. 16). В верхнее левое плечо моста включен измеряемый конденсатор (C_x — емкость конденсатора, r_x — сопротивление его потерь), а в верхнее правое плечо — образцовый конденсатор.

Если мост не сбалансирован по напряжению (не скомпенсировано сопротивление r_x) и по фазе (не скомпенсирована емкость C_x), то на экране ЭЛТ наблюдается эллипс (рис. 16,*а*). С помощью потенциометра r_0 выравнивают напряжения, питающие мост, в ре-

зультате чего получается осциллограмма, показанная на рис. 16,*б*. Затем, регулируя образцовую емкость C_0, добиваются равенства фаз в плечах с реактивными элементами, вследствие чего в диагонали моста *АБ* исчезает ток разбаланса. Осциллограмма горизонтальной прямой (рис. 16,*в*) характеризует полный баланс моста:

$$C_x = \frac{R_2}{R_1} C_0; \quad r_x = \frac{R_1}{R_2} R_0.$$

Для этих измерений необходимо использовать ЭЛО с возможно большей чувствительностью (например, типа С1-1) и большим диаметром ЭЛТ, что позволит определить момент баланса моста с минимальной ошибкой (1—3%). Следует иметь в виду, что не всегда удается полностью скомпенсировать сопротивление потерь r_x, вследствие чего осциллограмма (рис. 16,*в*) будет иметь форму сильно вытянутого по горизонтали эллипса Момент максимального приближения к балансу моста можно установить наиболее точно при наибольшем усилении сигналов в обоих каналах ЭЛО.

Самостоятельное использование усилителей ЭЛО. Усилители вертикального и горизонтального отклонений осциллографа можно использовать отдельно от каналов *Y* и *X* (см. рис 1).

Усилитель вертикального отклонения обладает хорошими техническими характеристиками: широкой полосой пропускания (в отдельных случаях, как, например, в ЭЛО типа С1-4 усилитель является усилителем постоянного тока с полосой пропускания 0—1 МГц), стабильным и довольно большим коэффициентом усиления в рабочей полосе частот, линейной фазовой характеристикой. Подключая его, необходимо помнить, что, как правило, выходные каскады усилителя собраны по двухтактной схеме и с ЭЛТ связаны непосредственно, а поэтому напряжение с усилителя следует снимать (через переходные конденсаторы емкостью не менее 0,1 мкФ) с корпуса и с одной из ламп оконечного каскада или с обеих ламп.

То же самое можно сказать и об усилителе горизонтального отклонения, хотя его характеристики по сравнению с усилителем вертикального отклонения несколько хуже.

Использование генератора развертки. Канал горизонтального отклонения осциллографа можно использовать и как устройство, вырабатывающее напряжение пилообразной формы, которое можно снять с выхода канала $П_3$; $П'_3$ при установке на рис. 1 переключателя $П_5$ в положение *1* (при внутренней синхронизации генератора развертки) или в положение *2* (при внешней его синхронизации), а переключателя $П_6$ — в положение *1*.

Самостоятельное использование ЭЛТ. Электронно-лучевая трубка может служить самостоятельным индикатором В этом случае сигнал, поданный непосредственно на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ, искажается меньше, так как он минует усилитель вертикального отклонения. Напряжение сигнала при этом должно быть достаточно большим, чтобы размер осциллограммы позволял сделать необходимые измерения Величина напряжения этого сигнала находится по заданным размерам осциллограммы *l* (см рис. 8) и чувствительности вертикально отклоняющих пластин ЭЛТ h_y. Например, на экране ЭЛТ типа 8ЛО29 (h_y=0,23 мм/В) нужно получить осциллограмму с размером по вертикали l=40 мм При этом подаваемое на ЭЛТ напряжение должно быть

$$U_м = l/h_y = 40/0{,}23 \approx 175 \text{ В}.$$

Поскольку исследуемое напряжение обычно снимается относительно корпуса, то одну из вертикально отклоняющих пластин нужно через емкость порядка 0,1—0,05 мкФ также соединить с корпусом, а сам сигнал подавать на другую пластину.

Развертывающим напряжением в этом случае может быть как напряжение генератора развертки ЭЛО, синхронизированное исследуемым сигналом, так и посторонний источник, напряжение которого либо усиливается в канале горизонтального отклонения, либо непосредственно подается на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ.

ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Измерение частоты гармонических колебаний при помощи осциллографа основано на сравнении периодов колебаний проверяемого источника гармонических сигналов и эталонного генератора. При этом ЭЛО служит индикатором, по которому судят о соотношении периодов этих колебаний.

Наиболее часто эти измерения делают с помощью получаемых на экране ЭЛТ интерференционных фигур — фигур Лиссажу[1]. В другом, не менее распространенном методе применяют круговую развертку.

Получение интерференционных фигур (фигур Лиссажу). Для измерения частоты по фигурам Лиссажу (рис 17,*а*) необходим вспомогательный высокостабильный генератор эталонной частоты, обеспечивающий как плавную ее перестройку, так и высокую точность отсчета. Результат измерения не зависит от того, к какому из входов ЭЛО подключен тот или иной генератор, и поэтому не обязательно придерживаться именной этой схемы.

Подав оба сигнала на входы ЭЛО, регулировкой усиления в каналах ЭЛО и выходных уровней обоих генераторов устанавливают удобный для наблюдения размер осциллограммы Генератор развертки ЭЛО в этом случае не работает, так как развертка осуществляется напряжением эталонного генератора.

Затем, перестраивая частоту эталонного генератора, получают простейшую интерференционную фигуру — эллипс (рис 17,*б*). Полученная осциллограмма свидетельствует о равенстве частот колебаний обоих генераторов.

Эллипс получается из-за начального фазового сдвига колебаний, а также из-за неидентичности фазовых характеристик усилителей ЭЛО (на рис. 17,*б* напряжение, подаваемое на вход *X*, несколько опережает по фазе напряжение, подаваемое на вход *Y* ЭЛО). Если фазы обоих колебаний совпадают и амплитуды их одинаковы, то на экране ЭЛТ получится прямая, наклоненная к оси *X* под углом 45° (рис. 18,*а*).

[1] Французский ученый, который в 1855 г. впервые демонстрировал интерференционные фигуры с помощью луча света и двух плоских зеркал, расположенных под прямым углом друг к другу.

Как правило, получаемая осциллограмма неустойчива из-за нестабильности частоты сигналов обоих генераторов. Перестройкой частоты эталонного генератора осциллограмму делают неподвижной и по его шкале установки частоты находят искомую частоту для

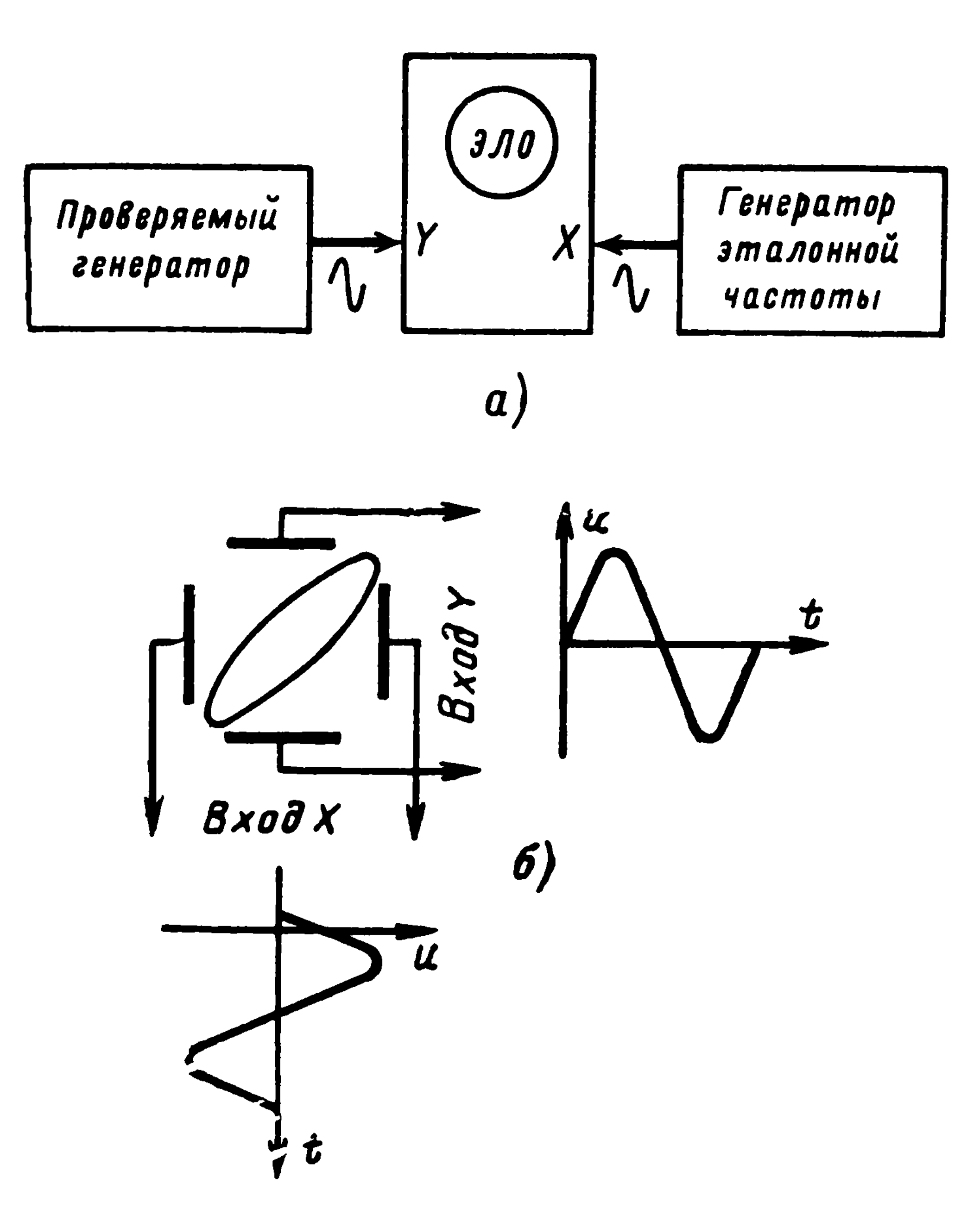


Рис. 17. Измерение частоты гармонических колебаний методом фигур Лиссажу.

этого момента времени. Нетрудно показать, что чем выше сравниваемые частоты, тем строже требование к их стабильности.

Так, например, при измерении частоты $f=100$ Гц, уход которой Δf за 1 с составляет 1 Гц, а нестабильность соответственно равна:

$$\alpha=\Delta f : f=1 : 100=10^{-2},$$

получить неподвижную осциллограмму совсем нетрудно.

Если же частота $f=100$ кГц, то при $\alpha=1\cdot10^{-2}$ уход частоты за 1 с составит:

$$\Delta f=\alpha f=1\cdot10^{-2}\cdot100\cdot10^{3}=1000 \text{ Гц}.$$

Очевидно, что получить такие же условия для измерения, как в предыдущем примере, не удастся и чтобы достигнуть их, надо использовать генератор с нестабильностью $\alpha=1\cdot10^{-5}$.

В рассмотренных примерах нестабильность частоты эталонного генератора не учитывается, так как предполагают, что она значительно меньше нестабильности частоты проверяемого генератора.

Совершенно не обязательно получать осциллограмму в виде эллипса. Может быть получена любая другая фигура Лиссажу (рис. 18), по виду которой нетрудно определить соотношение периодов исследуемых сигналов, т. е. найти неизвестную частоту.

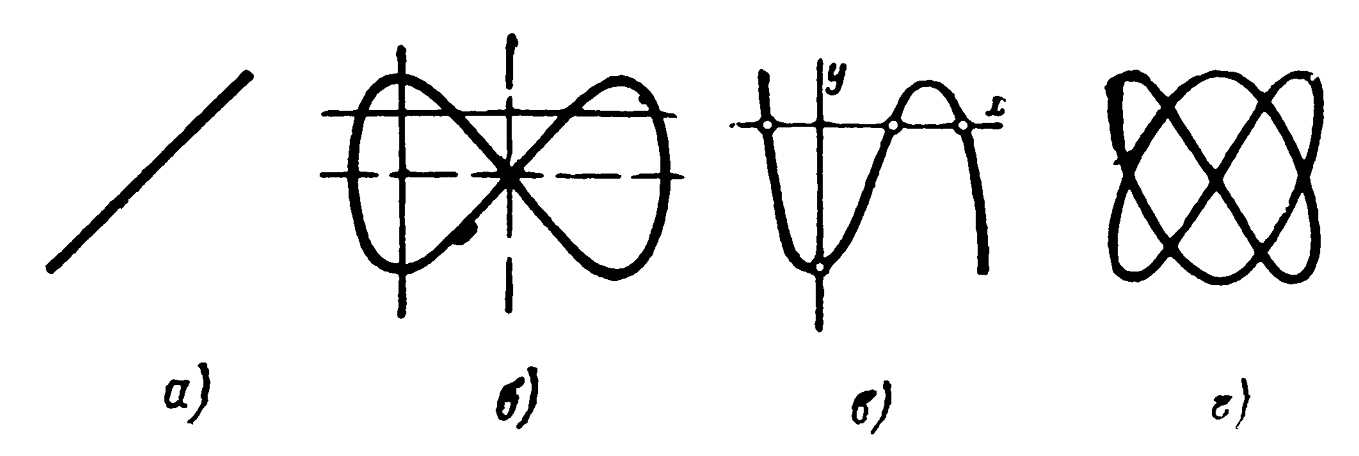


Рис. 18 Осциллограммы фигур Лиссажу.

Рассмотрим фигуру на рис. 18,*в*. Расположив оси координат так, как указано на рисунке, т. е. не по центру осциллограммы, получим несколько точек пересечения: по оси y — одна точка ($m_y=1$), по оси x — три точки ($n_x=3$). Значения чисел m_y и n_x объясняются следующим образом: напряжение, поданное на вход Y ЭЛО, перемещает луч по вертикали, и он за определенный отрезок времени пересекает ось x в n_x точках; напряжение, поданное на вход X ЭЛО, перемещает луч по горизонтали, и он за тот же промежуток времени пересекает ось y в одной точке. В тот момент, когда фигура неподвижна, периоды (частоты) обоих сигналов относятся как целые числа т, е.

$$T_y/T_x=f_x/f_y=m_y/n_x \quad \text{или} \quad f_y m_y=f_x n_x,$$

где T_y и f_y — период и частота сигнала, поданного на вход Y ЭЛО, а T_x и f_x — период и частота сигнала, поданного на вход X.

Эти соотношения пригодны для любых значений частоты.

В нашем случае

$$T_y/T_x=1/3, \text{ т. е. } f_y=3f_x \text{ или } T_x=3T_y.$$

Последнее равенство говорит о том, что на один период сигнала, поданного на вход X, приходится три периода сигнала, поданного на вход Y, почему мы и говорим об одном и том же отрезке времени.

На осциллограмме (рис. 18,*б*) пунктиром показаны неверно размещенные оси координат (по центру фигуры); при этом $m_y=1$, $n_x=3$, в то время как правильное их расположение дает $m_y=2$, $n_x=4$.

Другой способ отсчета чисел m_y и n_x состоит в том, что на полученной фигуре Лиссажу проводят взаимно перпендикулярные касательные (оси), как показано на рис. 19,*а*, и подсчитывают число касаний. В случае, если фигура заканчивается точкой (незамкнутая кривая, рис. 19,*б*), то касание в ней принимается равным $^1/_2$. Нахождение искомой частоты производят по вышеуказанным формулам.

Рассмотрим процесс образования фигуры Лиссажу, например, для случая

$$u_y=0{,}5U_м \sin(2\omega t-\pi/4); \; u_x=U_м \sin \omega t.$$

Из аналитической записи сигналов следует, что на вход Y ЭЛО подано гармоническое напряжение u_y, амплитуда которого в 2 раза меньше, а частота в 2 раза больше соответствующих параметров напряжения u_x, поданного на вход X. Кроме того, напряжение u_y сдвинуто по фазе относительно напряжения u_x на —45°

Для построения фигуры Лиссажу из этих напряжений изобразим их графически (рис. 20) и, разделив на равные интервалы один и тот же промежуток оси ωt, снесем ординаты одноименных точек на общий график. В результате получим осциллограмму, которая начинается и заканчивается в точках *1*; *17*.

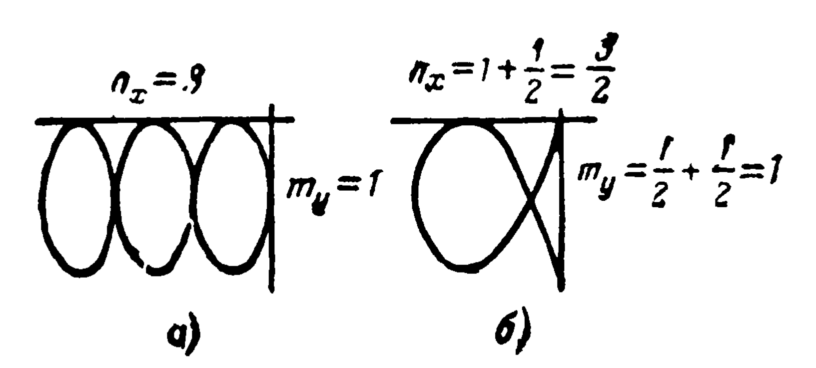


Рис. 19. Способ отсчета чисел m_y и n_x.

При измерении частоты эталонный генератор следует считать и опорным, т. е. таким, начальная фаза сигнала которого равна нулю. Тогда по фигуре Лиссажу можно определить не только частоту, но и начальную фазу напряжения поверяемого генератора. Фазовый сдвиг в каналах ЭЛО можно измерить и учесть или в первом приближении пренебречь им. Более подробно измерение сдвига фаз рассмотрено в следующем разделе.

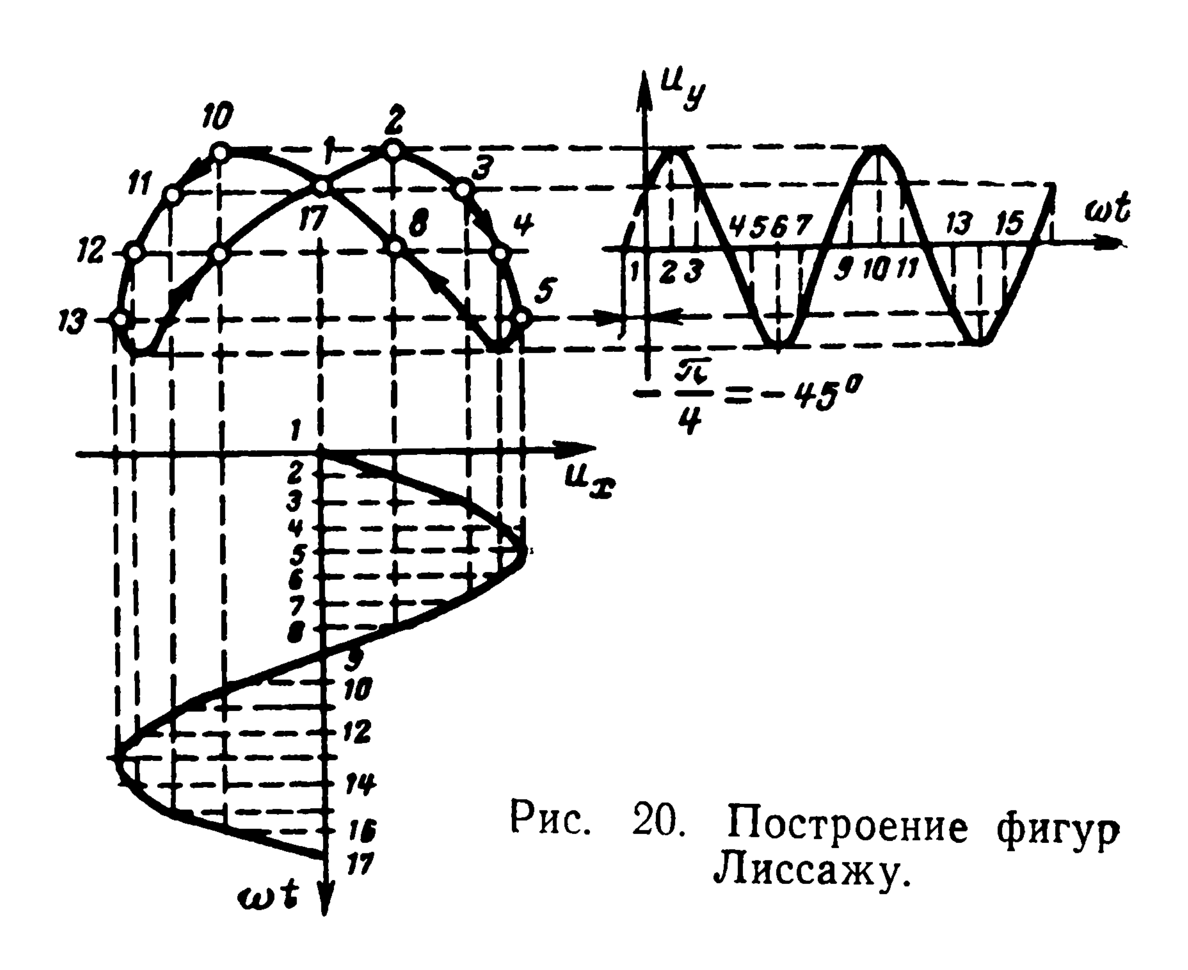


Рис. 20. Построение фигур Лиссажу.

Как видно из рассмотренного примера, выравнивать амплитуды сигналов не обязательно. На рис. 21 приведены возможные формы интерференционных фигур в случае, если один или оба сигнала отличаются от чисто гармонического колебания.

Ранее мы рассматривали фигуры Лиссажу, получаемые от сигналов кратных частот. Некоторый интерес представляют осциллограммы, образованные сигналами, содержащими высшие гармони-

ки основной частоты. На рис. 22,*а* приведена осциллограмма, полученная от сигналов

$$u_y = U_y \sin \omega t + U_{y2} \sin 2\omega t; \quad u_x = U_x \sin \omega t.$$

На рисунке показаны следующие величины:

m_1 и m_2 — максимальные раскрытия верхнего и нижнего лепестков; α — угол наклона оси лепестка к горизонтальной оси; U_y и U_{y2} — соответственно амплитуды первой и второй гармоник сигнала u_y. Начальные фазы всех колебаний равны нулю. Основные частоты сигналов одинаковы

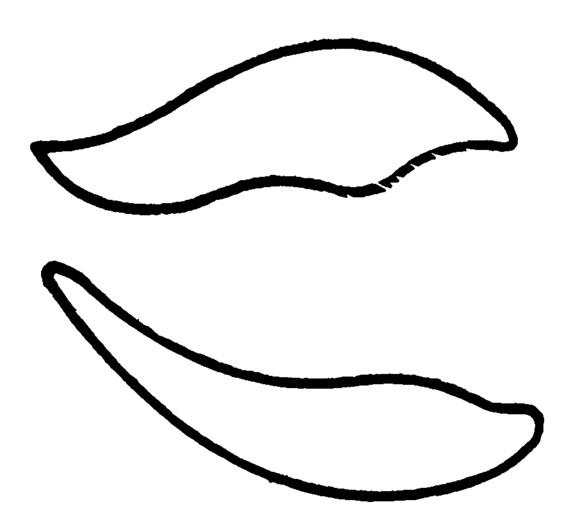


Рис. 21. Интерференционные фигуры на экране ЭЛТ.

По указанной осциллограмме, измерив по масштабной сетке величины U_y, U_{y2}, m_1, m_2 и α, можно определить отношение амплитуд первой и второй гармоник напряжения u_y по формуле

$$U_{y2} : U_y = (m_1 + m_2) : 4U_y \cos \alpha.$$

В нашем случае $m_1 = m_2$; если же начальные фазы напряжений u_y и u_x будут различными, то $m_1 \neq m_2$.

На рис. 22,*б* приведена осциллограмма, полученная от сигналов

$$u_y = U_y \sin \omega t + U_{y3} \sin 3\omega t; \quad u_x = U_x \sin \omega t.$$

В обычной практике измерения частоты по фигурам Лиссажу отношения частот не превышают 10 : 1—10 : 9 Более высокие отно-

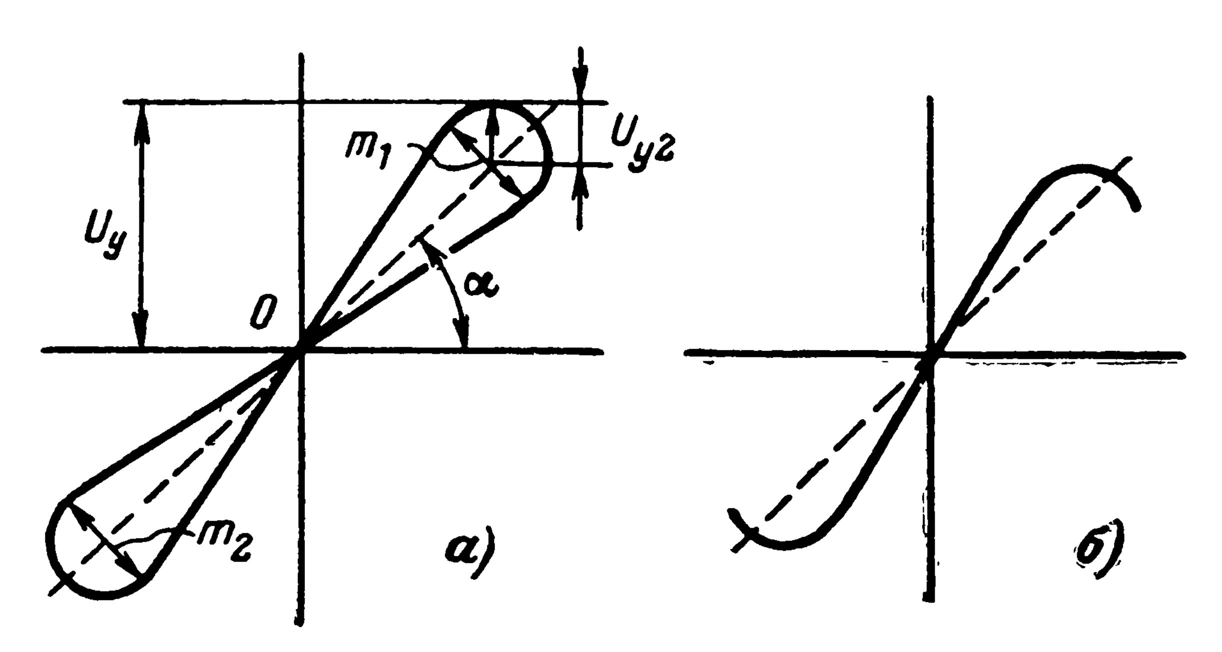


Рис. 22. Осциллограмма, образованная сигналами, содержащими высшие гармоники основной частоты.

шения значительно усложняют фигуру, а нестабильность частот генераторов делает измерение затруднительным.

Погрешность измерения частоты с помощью фигур Лиссажу в основном определяется погрешностью установки частоты эталонного генератора и правильностью подсчета числа точек пересечений или касаний фигуры с осями координат.

Погрешность δ установки частоты промышленных генераторов в технических описаниях указывается по-разному. Например, у генератора Г4-1А $\delta = \pm 1\%$ (от установленной частоты), а у генератора Г3-18 $\delta = \pm (0{,}01F + 2)$ Гц, где F — также установленное зна-

чение частоты. Если при измерениях указанные генераторы используются как эталонные, а в подсчете числа точек пересечений или касаний ошибки не допущено, то можно утверждать, что погрешность частоты коверяемого источника также равна δ.

Применение круговой развертки. Измерение частоты при помощи круговой развертки осуществляется по блок-схеме рис. 23,*а*. Для получения круговой развертки кроме эталонного генератора необходим фазорасщепитель или фазовращатель, обеспечивающий

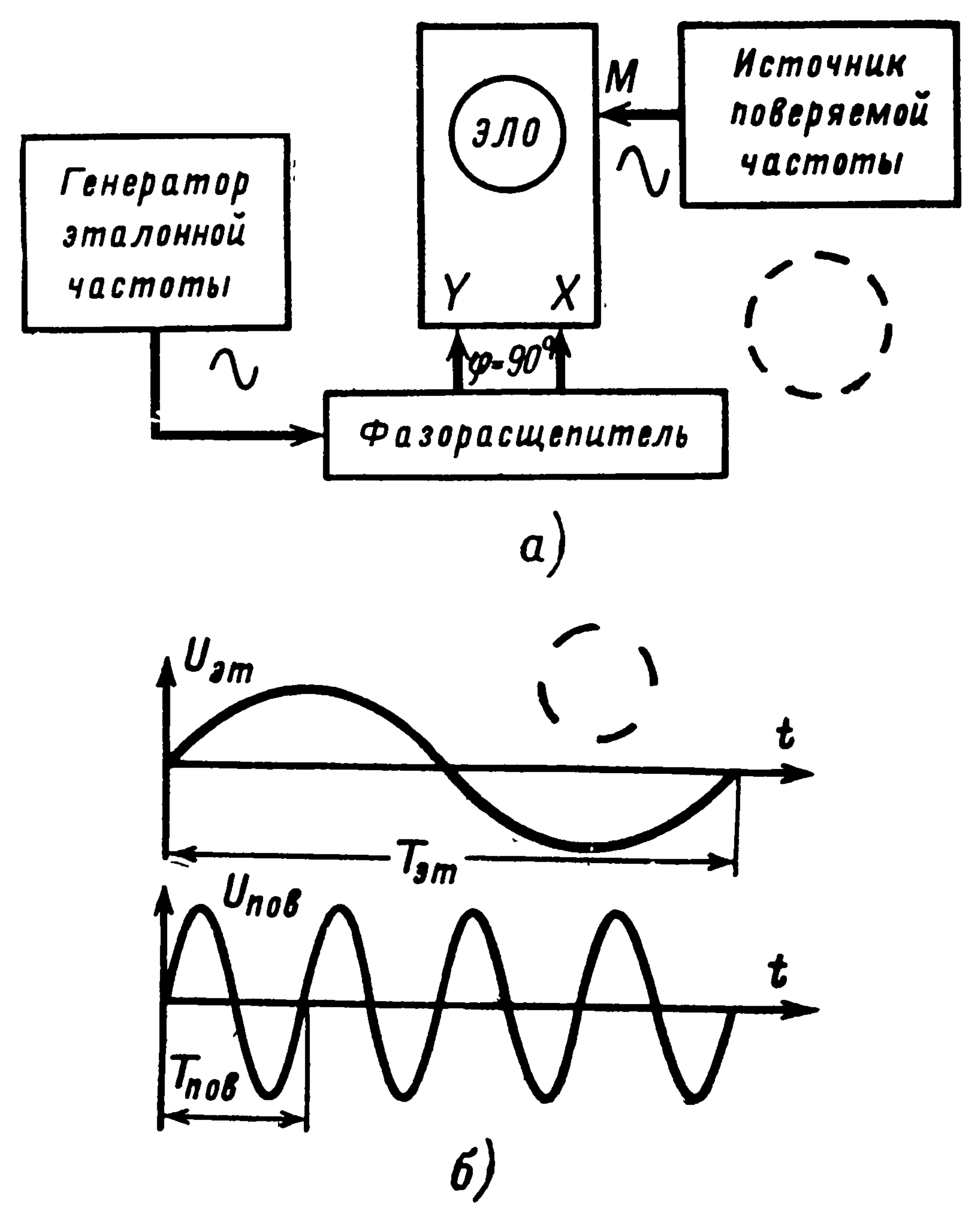


Рис. 23. Измерение частоты гармонических колебаний при помощи круговой развертки.

сдвиг фазы сигнала эталонной частоты на 90° в диапазоне измеряемых частот.

Методика измерения такова. Подав гармонический сигнал от генератора эталонной частоты на фазорасщепитель и регулируя усиление обоих каналов ЭЛО, на экране ЭЛТ получают четкую окружность размером примерно 0,8 диаметра. На управляющий электрод ЭЛТ (модулятор *М* или вход *Z* ЭЛО) подают гармоническое напряжение от источника поверяемой частоты и, перестраивая частоту эталонного генератора, добиваются целого соотношения между их периодами (частотами), как показано на рис. 23,*б*. При этом осциллограмма становится неподвижной и представляет собой окружность с равными темными и светлыми промежутками, число n которых равно отношению $T_{эт}/T_{пов}$. Подсчитав их количество,

находим число периодов $T_{пов}$, т. е. частоту $f_{пов}$ поверяемого устройства:

$$T_{эт}=nT_{пов},\ f_{пов}=nf_{эт},\ n=1,\ 2,\ 3\ldots$$

Получение пунктирной окружности объясняется тем же физическим явлением, о котором уже говорилось при рассмотрении работы калибратора длительности, — модуляцией луча ЭЛТ по яркости. Напомним, что величина напряжения поверяемого устройства должна быть достаточной для запирания луча.

При соотношении периодов, приведенном на рис. 23,*б* ($T_{эт}=4T_{пов}$), осциллограмма имеет четыре светлых и четыре темных промежутка, а $f_{пов}=4f_{эт}$. Окружность не будет вращаться лишь при кратном отношении частот источников сигналов, что предъявляет такие же требования к стабильности частоты эталонного генератора, как и при использовании фигур Лиссажу.

Измерение частоты с помощью круговой развертки имеет ряд особенностей. Во-первых, в измерительной схеме применяется фазорасщепитель, упрощенные схемы которого приведены на рис. 24,*а—в*. К левым зажимам схем подключаются преобразуемые

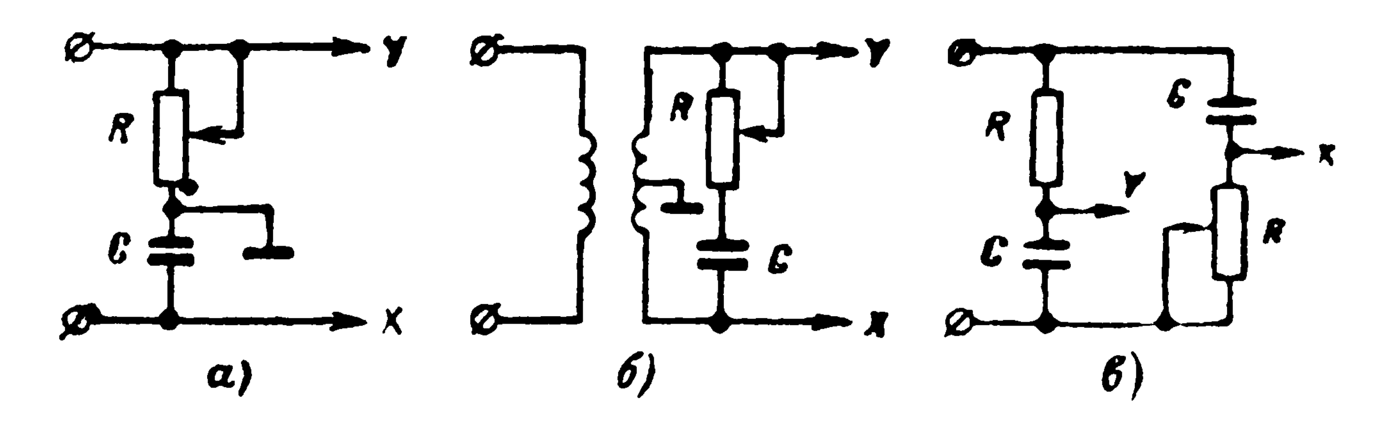


Рис. 24. Схемы фазорасщепителей.

напряжения, а с правых выходов сигналы, сдвинутые относительно друг друга на 90°, подаются на вертикальный Y и горизонтальный X входы ЭЛО. Элементы схем подбираются из соотношения

$$R=X_c=1/\omega_н C,$$

где $\omega_н$ — номинальное значение частоты, для которой получена круговая развертка.

Для достижения этого равенства в некотором диапазоне частот, не превышающем ±20% номинальной частоты, в схемах используются подстроечные резисторы. Кроме того, можно применять регулировку усиления в каналах ЭЛО. И, наконец, используют широкополосные квадратурные фазорасщепители, позволяющие получать круговую развертку в большом частотном диапазоне.

Во-вторых, круговую развертку можно использовать при большем, чем позволяют фигуры Лиссажу, соотношении частот — порядка 20 : 1, но недопустимо их дробное отношение, например 4 : 3, так как за один период эталонного сигнала должно уложиться целое число периодов поверяемого сигнала Если же окажется, что n равно дробному числу, т. е. больше или меньше единицы, то осциллограмма начнет вращаться.

Положим, что частоты $f_{пов}$ и $f_{эт}$ ненамного отличаются от кратного отношения, т. е. $f_{пов}=nf_{эт}\pm F$ (частота F не более 10 Гц).

При этом пунктирная окружность начинает вращаться, а направление вращения определяет знак расхождения частот, который лучше всего предварительно определить опытным путем при заведомо известных соотношениях частот:

$$f'_{пов}>nf_{эт} \quad и \quad f''_{пов}<nf_{эт}.$$

Величину расхождения F можно определить, подсчитав число дуг N, проходящих через радиальную линию на ЭЛТ за определенный промежуток времени Δt, который можно измерить, например, секундомером. Тогда

$$F=N/\Delta t.$$

Погрешность измерения частоты, как и в случае применения фигур Лиссажу, зависит от погрешности установки частоты эталонного генератора и правильности подсчета числа n меток на осциллограмме.

Рассмотрим еще одну схему измерения частоты, используемую при модуляции напряжения круговой развертки (рис. 25,*а*). Эталонное напряжение подключается к зажимам *1—2*, а напряжение поверяемого источника — к зажимам *1—3*. Потенциометр R используется для подстройки размеров круговой развертки, а потенциометр R_1 — для изменения величины измеряемого сигнала. С конденсатора C напряжение поступает на вход X ЭЛО, а с движка потенциометра R_1— на вход Y ЭЛО. В результате получается осциллограмма вида (рис. 25,*б*), которая позволяет достаточно просто определить искомую частоту на основе вышеприведенных соотношений для круговой развертки. Здесь n равно числу выступов (впадин), размещенных по периметру окружности. В нашем примере

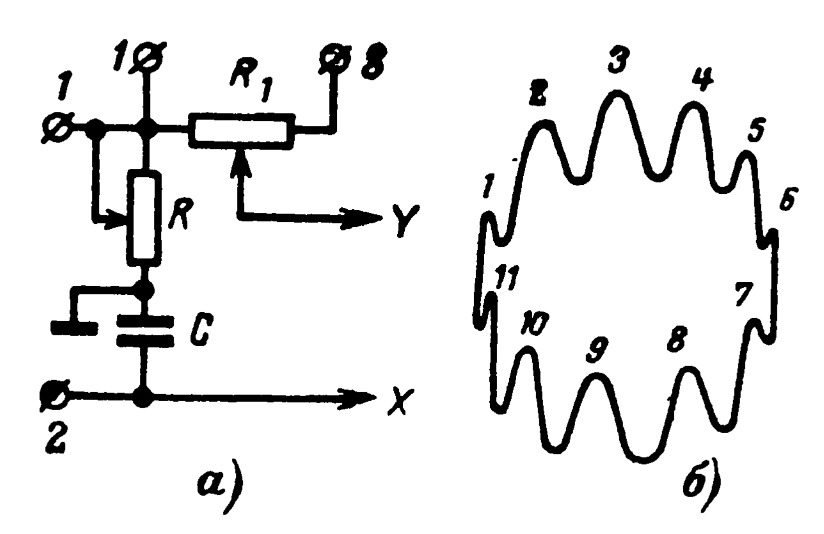


Рис. 25 Схема измерения частоты при модуляции напряжения круговой развертки.

$$f_{пов}=11f_{эт}.$$

Все сказанное ранее относительно элементов схемы фазорасщепителя, кратности частот и погрешности измерения применимо и в этом случае.

Сравнивая способы измерения частоты с помощью интерференционных фигур и круговой развертки, видим, что первый способ весьма прост, и нагляден, благодаря чему он распространен больше. Его недостатки следующие: при соотношении периодов больше 10 фигуры Лиссажу становятся слишком запутанными из-за фазовых сдвигов и нестабильности частоты, поэтому данный способ обычно используется в относительно небольшом диапазоне частот (от единиц герц до нескольких десятков килогерц). Применение кварцевых генераторов позволяет вести измерения на значительно больших частотах.

Второй способ измерения не зависит от фазовых соотношений сигналов и дает возможность получить кратность периодов порядка 15—20, но требует применения фазорасщепителей.

С помощью ЭЛО и эталонного генератора можно измерять не только частоту, но и длительность процесса Для этого напряжение эталонного сигнала подают на модулятор ЭЛО, а измеряемый сигнал — на вход Y. Происходит модуляция луча по яркости. Зная частоту эталонного генератора, которая должна быть значительно больше частоты исследуемого сигнала, и подсчитав число меток, легко определить длительность.

В заключение рассмотрим одну из схем квадратурного фазорасщепителя [Л. 12], работающего в диапазоне низких частот. Функциональная схема устройства (рис. 26) подобна схеме автоматической подстройки частоты, так как в ней осуществляется измерение полученного фазового сдвига и вырабатывается сигнал коррекции, который используется для уменьшения разности между полученным и требуемым сдвигом фаз.

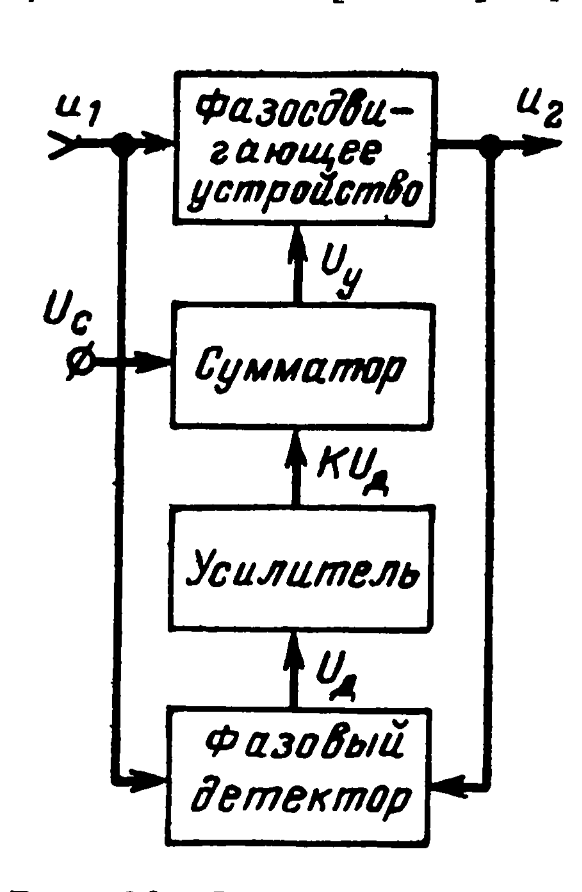


Рис. 26. Функциональная схема квадратурного фазорасщепителя.

Функциональная схема состоит из следующих узлов:

фазосдвигающего устройства, которое сдвигает фазу выходного напряжения u_2 на φ радиан относительно начальной фазы напряжения u_1 входного сигнала (изменение фазы осуществляется RC-элементами устройства);

сумматора, в котором происходит сложение напряжения U_c и напряжения фазового детектора, усиленного усилителем;

усилителя напряжения с коэффициентом усиления K;

фазового детектора, предназначенного для выделения напряжения $U_д$, пропорционального фазовому сдвигу между входным и выходным напряжениями.

На вход схемы подается опорное напряжение $u_1=U_м \cos \omega t$. На выходе фазосдвигающего устройства получаем сигнал $u_2=U_м \times \times \cos(\omega t-\varphi)$, сдвинутый по фазе относительно опорного на φ радиан; величина этого сдвига определяется выражением

$$\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2}=\omega RC, \qquad (1)$$

где ω — частота входного сигнала; R и C — элементы схемы фазосдвигающего устройства.

Величину сопротивления R, т. е величину φ, можно регулировать путем подачи управляющего напряжения постоянного тока U_y, которое равно сумме напряжения смещения U_c и усиленного напряжения, полученного на выходе фазового детектора.

Фазовый детектор выдает напряжение постоянного тока $U_д$. величина которого пропорциональна фазовому сдвигу между входным и выходным сигналами

$$U_д=U_м \cos \varphi.$$

Таким образом, управляющее напряжение будет равно:

$$U_y = U_c + KU_д = U_c + KU_м \cos\varphi, \qquad (2)$$

где K — коэффициент усиления усилителя.

Легко заметить, что $U_y \gtrless U_c$ при $|\varphi| \lessgtr \pi/2$.

Положим, что на некоторой частоте входного сигнала ω сдвиг фаз между напряжениями u_1 и u_2 составляет $\varphi = \pi/2$, в результате чего $U_y = U_c$. Любое изменение величины ω при фиксированном значении R и C вызовет соответствующее изменение величины φ [см. формулу (1)], т. е. изменение напряжения U_y. Вследствие этого меняется режим работы управляемого сопротивления таким образом, чтобы поддержать вышеуказанное значение фазы неизменным, т. е. сохранить квадратурное соотношение между входным и выходным напряжениями в некотором диапазоне частот. Иными словами, поскольку величина R изменяется под воздействием напряжения U_y, то при изменении частоты сопротивление резистора меняется таким образом, чтобы восстановить равенство в формуле (1)

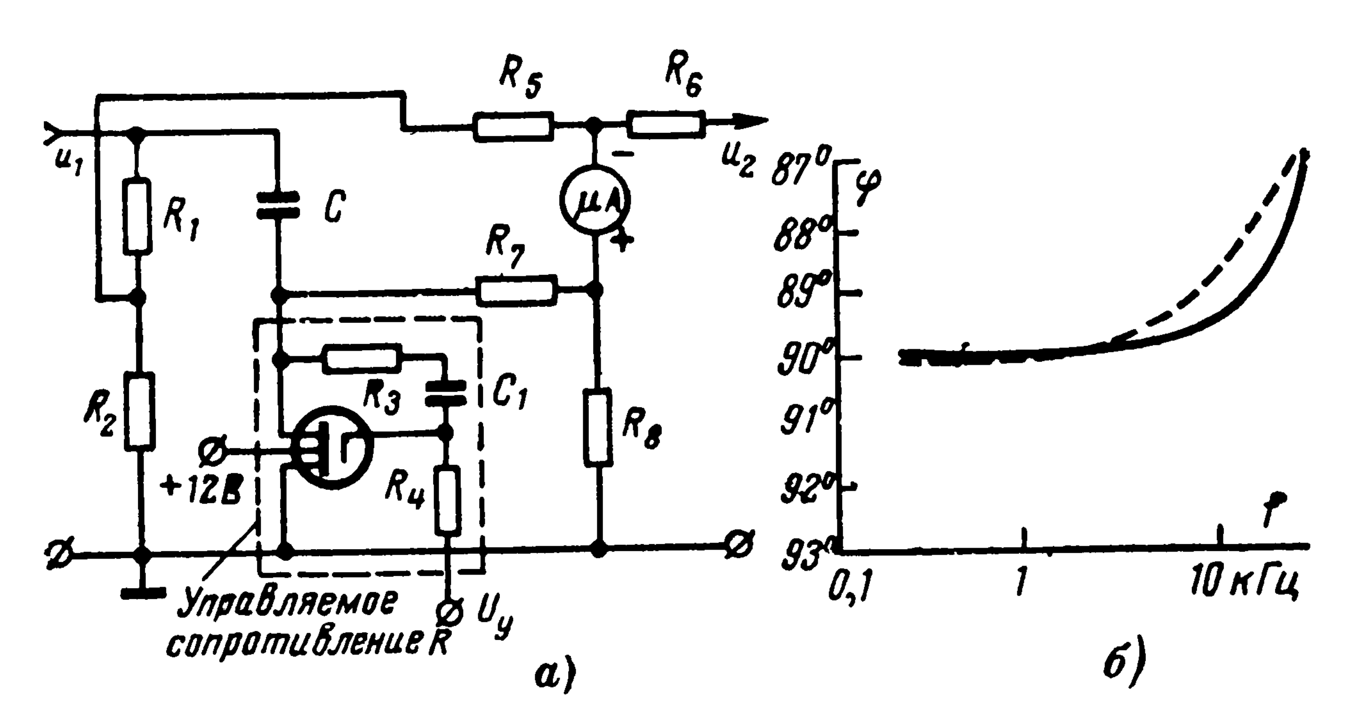


Рис. 27. Фазосдвигающее устройство.

а — принципиальная схема; *б* — фазочастотные характеристики; - - - — расчетная; ——— — экспериментальная.

Регулирующим элементом (резистором R) в схеме фазосдвигающего устройства является управляемый напряжением полевой транзистор (МОП-транзистор), сопротивление которого определяется отношением

$$R = 1 : [N(U_y - U_п)], \qquad (3)$$

где N — постоянная регулирующего элемента; $U_п$ — пороговое напряжение регулирующего элемента

Подстановка значений (2) и (3) в формулу (1) дает:

$$\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2} = \omega C : [N(U_c - U_п + KU_м \cos\varphi)].$$

Поскольку левая часть этого равенства с изменением частоты не меняется, то частотный диапазон, в котором может работать квадратурный фазовращатель, определится отношением максималь-

ной частоты ω_2 к минимальной частоте ω_1 при заданном значении погрешности $\pm\delta$ измерения фазы:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1}=\frac{(1-\sin\delta)(U_c-U_п+KU_м\sin\delta)}{(1+\sin\delta)(U_c-U_п-KU_м\sin\delta)}.$$

Принципиальная схема фазосдвигающего устройства приведена на рис. 27,*а*. Устройство представляет собой мост, в плечах которого включены два резистора (R_1 и R_2), один конденсатор C и полевой транзистор с изолированным затвором (в интегральном исполнении), в котором на полупроводниковую подложку подано напряжение +12 В. Этот транзистор с вспомогательными элементами соответствует регулируемому резистору R в формуле (1). Элементы схемы C_1, R_3 и R_4 применены для линеаризации изменения сопротивления транзистора.

Расчетная (пунктирная) и экспериментальная (сплошная) фазочастотные характеристики фазорасщепителя показаны на рис. 27,*б*; расхождение их в области высоких частот обусловлено неточностью определения постоянных в выражении (3). В частотном диапазоне 0,2—2 кГц максимальная погрешность установки сдвига на 90° между входным и выходным сигналами не превышает ±0,15°. Еще один диапазонный фазорегулятор следящего типа рассмотрен в [Л. 8].

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ

Измерять частоту следования импульсов можно теми же методами, что и частоту гармонических колебаний, но эти измерения имеют ряд особенностей [Л. 1].

Получение интерференционных фигур. Блок-схема измерения частоты следования импульсов такая же, как и для измерения частоты гармонических колебаний (см. рис. 17,*а*). Поверяемый генератор является источником импульсного напряжения, форма которого приведена в верхней части рис. 28. Наиболее распространены два варианта измерений.

П е р в ы й в а р и а н т. Регулируя усиление каналов ЭЛО и выходное напряжение обоих генераторов, получают удобную для наблюдения (по размерам) осциллограмму. Затем перестраивают частоту эталонного генератора, добиваясь неподвижности изображения, представляющего собой один вертикальный импульс. В случае, если импульсный сигнал подать на вход X, а эталонный — на вход Y, этот импульс займет горизонтальное положение. Получение о д н о г о импульса свидетельствует о кратном отношении периодов (частот) измеряемого и эталонного сигналов (рис. 28,*а*, *б*):

$$T_{изм}=nT_{эт},\quad n=1,\ 2,\ 3\dots$$

Очевидно, что получаемый результат неоднозначен. Для устранения этой неопределенности поступают следующим образом: получив осциллограмму вида рис. 28,*а* или *б*, уменьшают частоту эталонного сигнала в 2 раза относительно исходной. При этом, если соотношение периодов соответствовало случаю рис. 28,*а*, то получится осциллограмма рис. 28,*в*, а если соотношение периодов соответствовало случаю рис. 28,*б*, то получится осциллограмма рис. 28,*а*. Нужно отметить, что этот вариант измерения осуществим при условии $n<5$, т. е. необходимо приблизительно знать частоту измеряе-

мого напряжения. Частоту эталонного генератора уменьшают до тех пор, пока **п о с л е д о в а т е л ь н о** не будут получены осциллограммы *а* и *б*. Затем частоту эталонного генератора вновь уменьшают относительно отсчета, полученного для осциллограммы рис. 28,*а*, в 3 раза, добиваясь получения осциллограммы рис 28,*г*

Проделав эти измерения и записав значения частот эталонного генератора, соответствующих осциллограммам на рис. 28,*а в*, *г*, еще

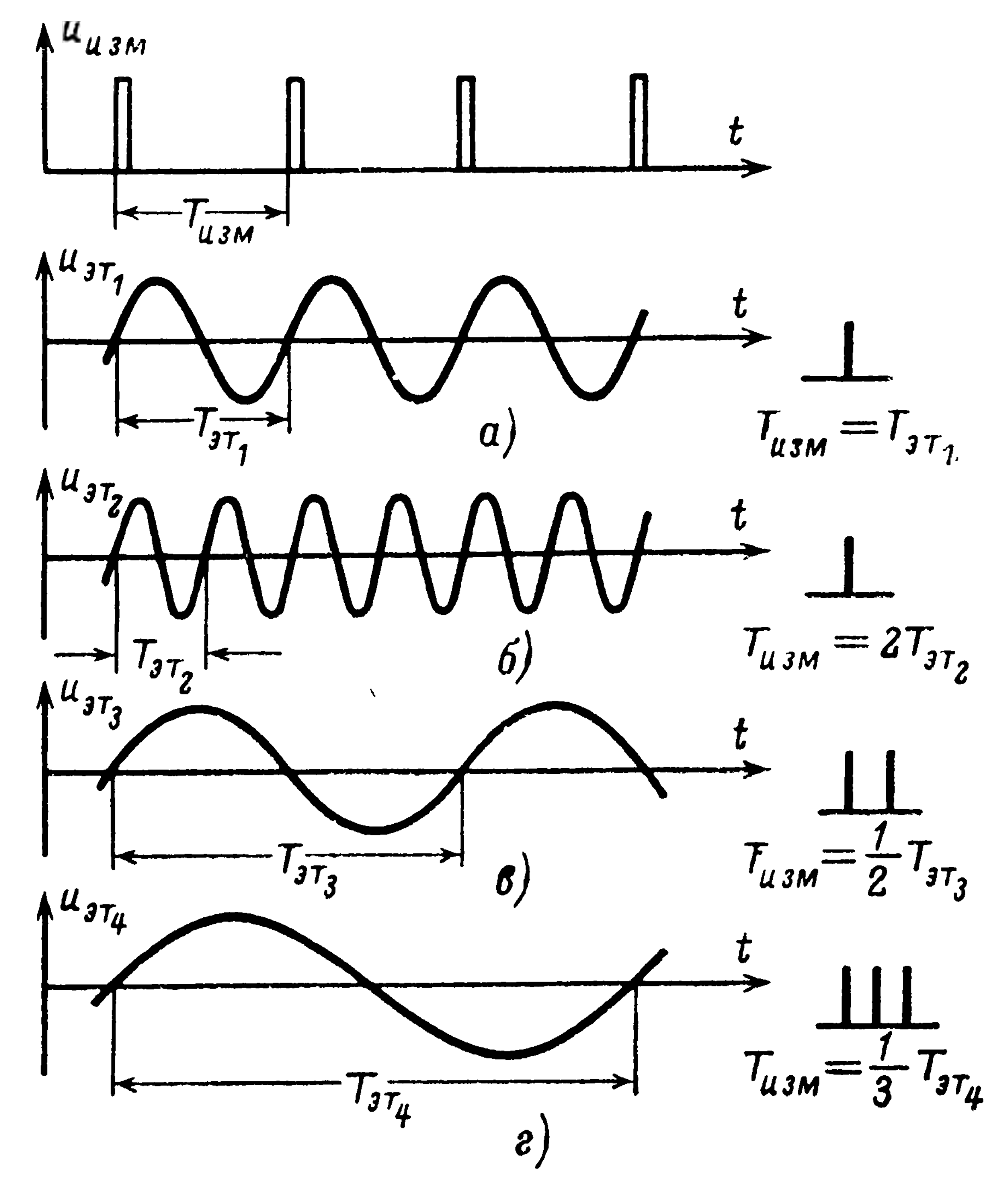


Рис. 28. Измерение частоты следования импульсов методом интерференционных фигур.

раз убеждаются в том, что все они получаются **п о с л е д о в а т е л ь н о.** После этого можно утверждать, что частота сигнала эталонного генератора при получении осциллограммы рис. 28,*а* равна частоте следования импульсов поверяемого устройства.

В т о р о й в а р и а н т. На вход *Y* ЭЛО подают напряжение поверяемого устройства (генератор развертки ЭЛО включен) и, регулируя частоту развертки, получают один период исследуемого сигнала. Заметив его протяженность по масштабной сетке, не трогая органов управления ЭЛО и отключив поверяемый генератор, ко входу *Y* подключают эталонный генератор. Изменяя его частоту, получают один период эталонного напряжения **т а к о й ж е п р о т я ж е н н о с т и,** т. е. добиваются приближенного равенства

$T_{изм} \approx T_{эт}$. Затем, подключив к ЭЛО оба источника так, как показано на рис. 17,*а* (генератор развертки ЭЛО нужно выключить), окончательно уравнивают периоды обоих источников сигналов, добиваясь условия, соответствующего рис. 28,*а*.

Все сказанное о погрешности измерения частоты гармонических колебаний полностью применимо и к данному случаю.

Применение круговой развертки. Блок-схема и методика измерения частоты такие же, как и рассмотренные выше при измерениях гармонических сигналов (см. рис. 23,*а*); поверяемый источник является генератором импульсного напряжения.

Поскольку сигнал импульсный и его длительность по сравнению с полупериодом гармонического колебания может быть значительно меньше, а полярность различной, осциллограммы в этом измерении отличаются от вышеприведенных. На рис. 29,*а* представ-

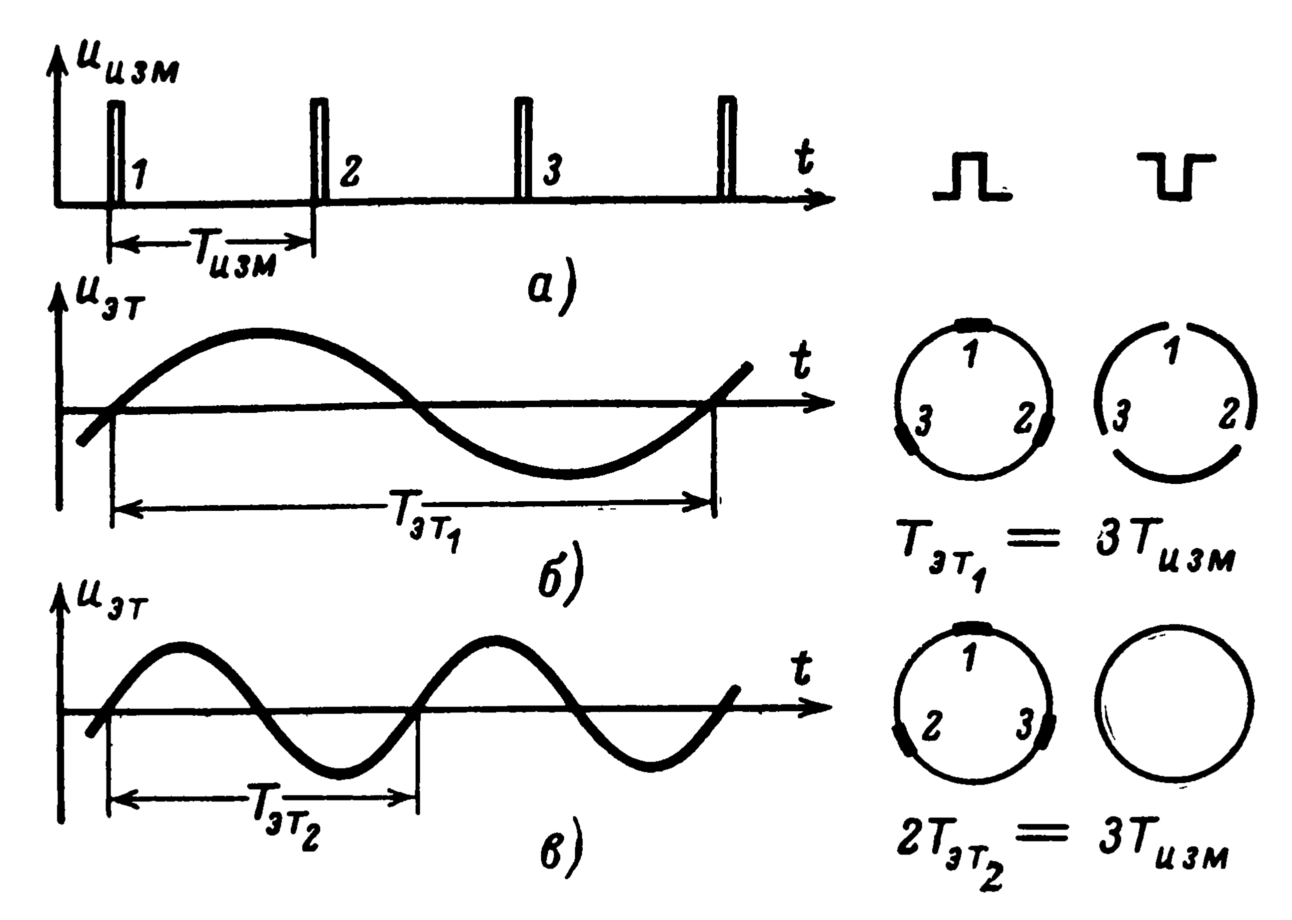


Рис. 29. Измерение частоты следования импульсов при помощи круговой развертки.

лены временные диаграммы поверяемого и эталонного (рис. 29,*б*, *в*) сигналов для различных случаев, а справа изображены осциллограммы, соответствующие положительной и отрицательной полярностям импульсного напряжения. Амплитуда импульса должна обеспечить запирание луча ЭЛТ.

Изменяя частоту эталонного генератора, получают неподвижную осциллограмму, которая при выполнении условия кратности периодов (в нашем случае $T_{эт1} = 3T_{изм}$ или $f_{изм} = 3f_{эт1}$) и положительной полярности импульсов будет иметь вид окружности с тремя яркими точками, протяженность которых соответствует длительности импульсов Эту осциллограмму можно сделать более четкой, снизив яркость свечения.

Если импульсы имеют отрицательную полярность, на окружности будут наблюдаться три темные точки, соответствующие запиранию луча ЭЛТ на время длительности импульсов.

Весьма возможно, что при перестройке частоты эталонного генератора отношение периодов будет выражаться дробно-рациональ-

ным числом, как на рис. 29,*в*, где это отношение определяется равенством $T_{эт2}=3/2T_{изм}$. В таком случае при положительной или отрицательной полярности импульсов на окружности вообще не будет меток. Это объясняется тем, что первый период $T_{эт2}$ даст на окружности точки или разрывы, соответствующие импульсам *1* и *2*, а второй период $T_{эт2}$ «сотрет» эти точки или разрывы и даст метку, соответствующую импульсу *3*. Потом этот процесс повторится, и поскольку обычно частота эталонного напряжения выше 15 Гц, глаз наблюдателя не в состоянии различить мелькания меток.

Рассмотрение обеих осциллограмм указывает средство для устранения неоднозначности, возникающей при положительной полярности импульсов: использовать импульсы только отрицательной полярности или подавать положительные импульсы на катод ЭЛТ.

Этот метод целесообразно применять при больших длительностях импульсов.

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Применение линейной развертки. Временны́е параметры можно определить при помощи калибратора длительности; в данном случае предполагается, что этот калибратор не используется.

Для измерений при помощи вспомогательных устройств необходимо откалибровать длину прямого хода генератора развертки ЭЛО и получить таким образом линейную шкалу на масштабной сетке, по которой можно будет непосредственно производить отсчеты временны́х интервалов [Л. 1]. Нелинейностью прямого хода развертки и длительностью обратного хода в первом приближении можно пренебречь.

Например, необходимо измерить временной интервал Δt между двумя импульсами (рис. 30)

Генератор опорного импульса вырабатывает импульсное напряжение, которое поступает на четырехполюсник и вход *У* ЭЛО (рис. 30,*а*). Исследуемым четырехполюсником может быть любая электронная схема (усилитель, генератор с посторонним возбуждением и т. п.), временную задержку которой Δt надо измерить.

Опорный импульс запускает генератор развертки, вырабатывающий пилообразное напряжение (рис. 30,*б*). Этот же импульс, пройдя четырехполюсник, задерживается в нем и попадает на вход канала *У*. На осциллограмме он располагается на расстоянии Δt от опорного. Длительность развертки выбирают такой, чтобы интервал между импульсами занимал весь диаметр ЭЛТ, что повышает точность измерения.

Калиброванная развертка — это такое пилообразное напряжение, которое имеет высокую линейность, незначительную протяженность обратного хода и известную длительность прямого хода. Частоту развертывающего напряжения обычно указывают в герцах или килогерцах Например, если такое напряжение имеет частоту 5 кГц, то нетрудно подсчитать, что длительность прямого хода

$$T=1/f=0{,}2 \text{ мс}.$$

Таким образом, используя эту развертку, один период которой укладывается в пределах диаметра ЭЛТ, можно получить ось отсчета времени длиной 0,2 мс.

Если же применяется ждущая развертка, которая имеет длительность, например, 100 мкс, то это говорит о том, что прямой ход одного такта ждущей развертки на экране ЭЛТ дает ось отсчета времени длиной 100 мкс.

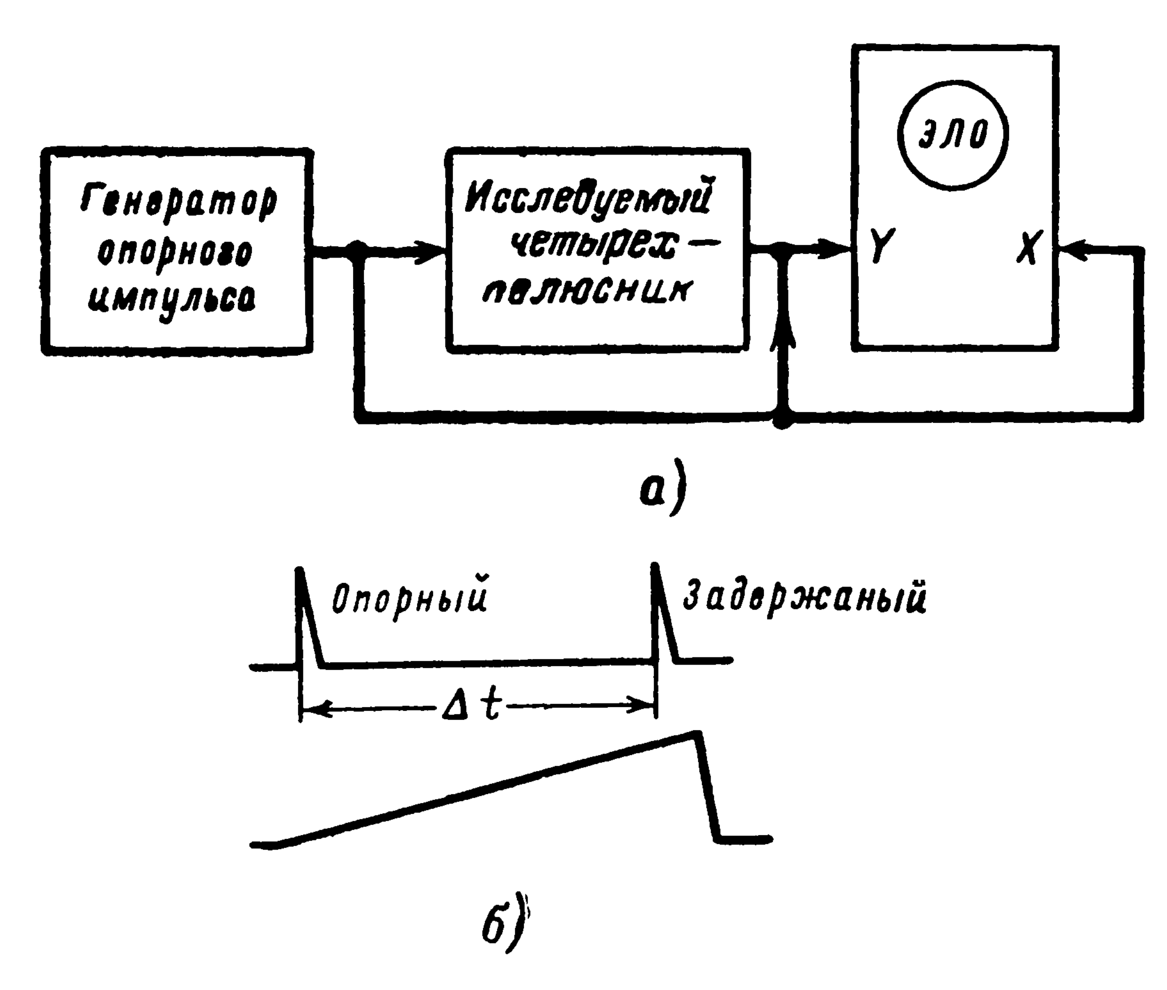


Рис. 30. Измерение временнóго интервала между двумя импульсами при помощи линейной развертки.

С помощью калиброванной развертки измерение временного интервала ведется следующим образом. Пусть на экране ЭЛТ получена осциллограмма, соответствующая временнóму интервалу Δt, длина которого 63 мм, используемая длительность развертки равна 500 мкс, а протяженность прямого хода по масштабной сетке равна 90 мм. Временной интервал находим из пропорции:

$$\frac{500}{90}=\frac{\Delta t}{63}; \quad \Delta t=\frac{500\cdot 63}{90}=350 \text{ мкс}.$$

Если развертка не калибрована, то ее можно откалибровать с помощью генератора гармонических колебаний. Для этого напряжение эталонного генератора определенной частоты, например 10 кгц, подают на вход Y ЭЛО (генератор развертки работает в режиме внутренней синхронизации). Перестраивая органы управления разверткой, получают один или несколько периодов гармонического сигнала на ЭЛТ.

Следует обратить внимание на то, чтобы не было искажений вида показанного на рис. 7,*а*.

Положим, что на экране ЭЛТ диаметром 100 мм получен один период гармонического сигнала, занявший расстояние 80 мм. Тогда можно считать, что в пределах этого интервала шкала масштабной сетки линейна в пределах от 0 до 100 мкс. Шкалой можно пользоваться, если не изменять положения органов управления разверт-

кой. Если на этом же участке уложились три периода той же частоты, то шкала линейна в пределах от 0 до 300 мкс.

Поскольку пределы измеряемого временного интервала заранее не известны, то измерения следует проводить в следующей последовательности: включить приборы по блок-схеме рис. 30,*а* и получить на экране ЭЛТ измеряемый временной интервал Δt; отключить четырехполюсник и, не трогая органов управления разверткой, подать на вход *Y* гармоническое напряжение эталонного генератора. Установить его частоту такой, которая давала бы целое число периодов внутри интервала Δt; для удобства расчетов лучше выбирать значения частоты, кратные десяти; откалибровав таким образом развертку, снова вернуться к схеме рис. 30,*а* и определить величину Δt.

Пределы измерения можно менять перестройкой частоты генератора развертки ЭЛО.

Применение круговой развертки. Так как длина окружности в π раз больше ее диаметра, то применение круговой развертки

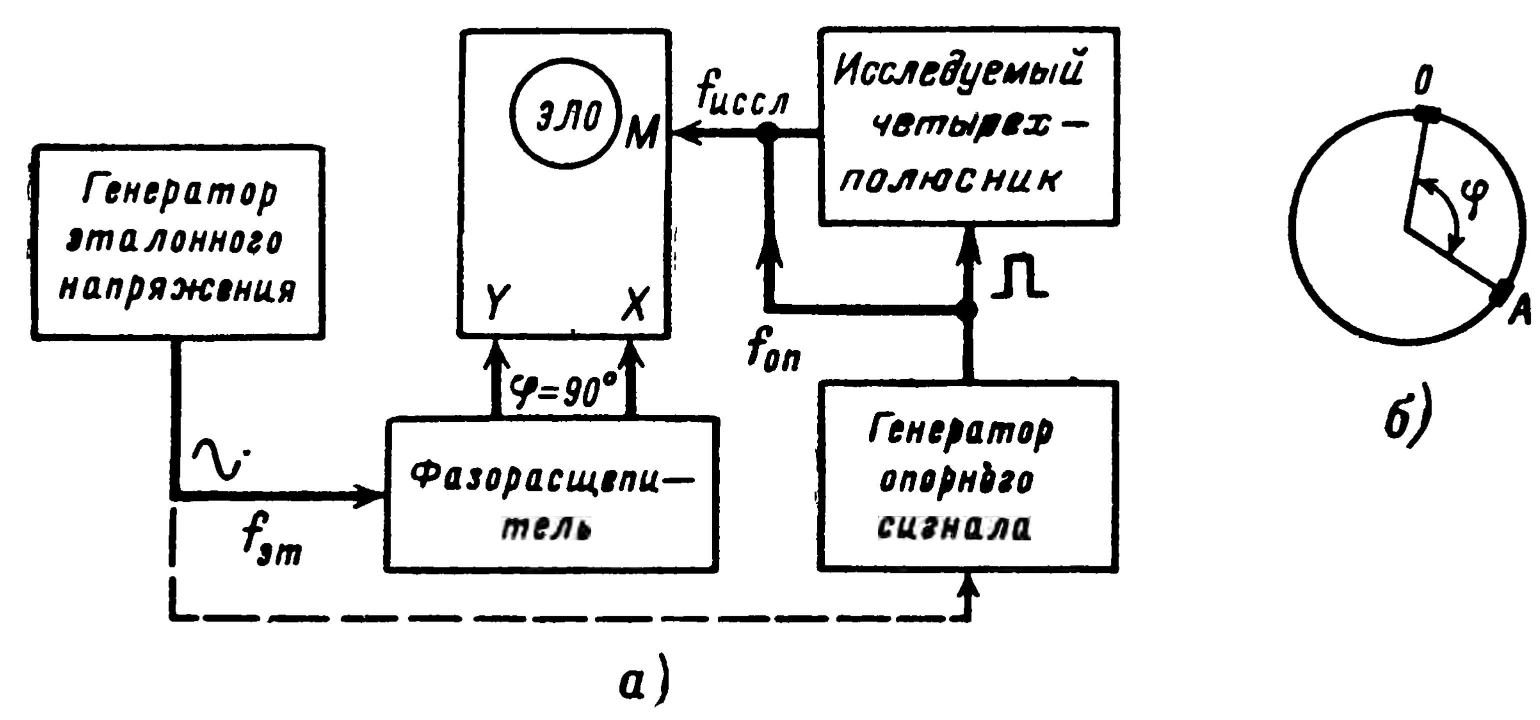


Рис. 31. Измерение временного интервала при помощи круговой развертки.

дает возможность при одном и том же диаметре ЭЛТ повысить точность измерения временного интервала по сравнению с вышеописанным примерно в два с лишним раза. Блок-схема измерения приведена на рис. 31,*а*.

При равных частотах эталонного генератора гармонического сигнала и генератора опорного импульсного напряжения на ЭЛТ получается круговая развертка с разнесенными по периметру окружности двумя метками. Показанная на рис. 31,*а* цепь синхронизации (пунктирная линия) генератора опорного сигнала в общем случае не обязательна, но она ускоряет процесс измерения.

Отключив четырехполюсник, опорный импульс подают на модулятор ЭЛТ *М* и, подстраивая частоту $f_{эт}$, получают на окружности одну неподвижную яркую метку *О* (рис. 31,*б*). Для улучшения четкости осциллограммы яркость свечения круговой развертки можно снизить. Убедитесь в том, что частоты обоих генераторов одинаковы.

Затем напряжение опорного импульса подают на исследуемый четырехполюсник, в котором оно задерживается на время Δt и

также поступает на модулятор. В результате на круговой развертке получают вторую метку A, сдвинутую относительно первой на угол φ. Измерив его по градусной сетке, находят временной интервал из соотношения

$$\Delta t = \frac{T_{эт}}{360^\circ} \varphi^\circ .$$

Например, $f_{эт}=1$ кГц ($T_{эт}=1000$ мкс), $\varphi=75^\circ$; при этом

$$\Delta t = \frac{1000}{360^\circ} \cdot 75^\circ = 208 \text{ мкс}.$$

ИЗМЕРЕНИЕ СДВИГА ФАЗ

Фазой гармонического сигнала (начальной фазой) называют расстояние между выбранными началом отсчета времени ($t=0$) и началом гармонического сигнала, размещенных на горизонтальной оси прямоугольной системы координат. Единицей измерения этого расстояния являются радианы, так как по оси откладывают значения ωt или $\frac{2\pi}{T} t$, где ω — угловая частота сигнала, рад/с, t — текущее время в секундах, T — период сигнала в секундах. Поскольку $2\pi=360^\circ$, то фазу можно измерять и в градусах.

Начало отсчета гармонического сигнала определяют по-разному в зависимости от функции, описывающей это колебание. Если сигнал задан синусоидальной функцией $\sin \omega t$, то началом его отсчета

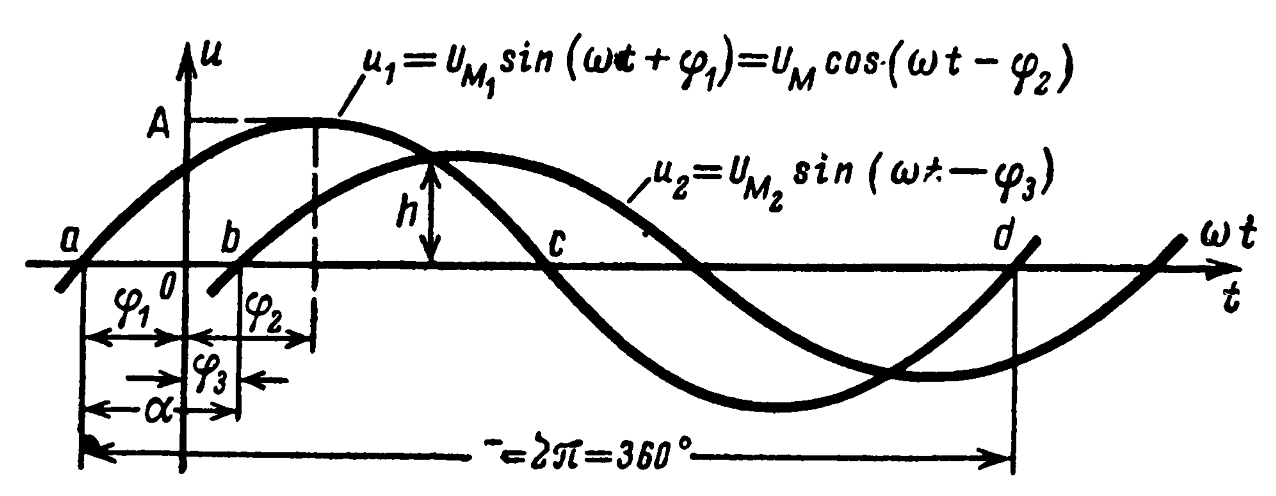


Рис. 32. Гармонические сигналы, отличающиеся по фазе.

будет значение времени, при котором $\sin \omega t=0$, $\omega \neq 0$, а функция переходит от отрицательных значений к положительным. Если же сигнал задан косинусоидальной функцией, то началом его отсчета будет значение времени, при котором $\cos \omega t=1$ ($\omega \neq 0$).

Обычно измеряемая фаза не превышает 2π рад, или 360°.

Знак фазы определяется расположением начала отсчета времени относительно начала сигнала, что наглядно показано на рис. 32.

Величину фазового сдвига вычисляют по формуле

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} \Delta t, \text{ рад, или } \varphi = \frac{360^\circ}{T} \Delta t, \text{ град,} \qquad (4)$$

где Δt — временной интервал между началами отсчета времени и сигнала.

Наиболее часто производят измерение разности фаз двух гармонических колебаний одной частоты Положим, нужно определить фазовый сдвиг α между сигналами.

$$u_1 = U_{м1} \sin(\omega t + \varphi_1) \text{ и } u_2 = U_{м2} \sin(\omega t - \varphi_3)$$

при условии: $T=1$ мс ($f=1$ кГц); $\Delta t_1 = aO = 40$ мкс; $\Delta t_3 = Ob = 25$ мкс; значения временных интервалов можно найти по масштабной сетке ЭЛО, если известны параметры напряжения развертки или частота сигнала

Вычитая аргумент второго сигнала из аргумента первого, получаем:

$$\alpha = (\omega t + \varphi_1) - (\omega t - \varphi_3) = \varphi_1 + \varphi_3.$$

По формуле (4) вычислим начальные фазы обоих сигналов:

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{1000} 40 = 0{,}08\pi\ (\text{рад}) \approx 0{,}25\ (\text{рад}) = 14{,}4^\circ;$$

$$\varphi_3 = \frac{2\pi}{1000} 25 = 0{,}05\pi\ (\text{рад}) \approx 0{,}157\ (\text{рад}) = 9^\circ.$$

Следовательно,

$$\alpha = \varphi_1 + \varphi_3 \approx 0{,}41\ (\text{рад}) = 23{,}4^\circ.$$

Разность фаз можно определить и иначе, если принять один из сигналов за опорный, т. е. определяющий начало отсчета, у которого начальная фаза равна нулю. Например, если перенести начало отсчета времени из точки O в точку a, т. е. приравнять нулю начальную фазу сигнала u_1, то фаза сигнала u_2 будет равна $-\alpha$ (отставание по фазе), и наоборот, если начало отсчета перенести в точку b (сигнал u_2 будет опорным), то фаза сигнала u_1 станет равной $+\alpha$ (опережение по фазе)

Метод эллипса. Измерение сдвига фаз методом эллипса можно осуществить по блок-схеме рис. 33,*а*. Сам процесс получения эллипса на экране ЭЛТ подробно описан в [Л. 2, 4] и здесь не рассматривается.

Напомним читателю уравнение эллипса, выраженное через величину фазового сдвига φ измеряемого напряжения, амплитудные X, Y и мгновенное c значения отклонения луча на экране ЭЛТ (рис. 33,*в*):

$$y = \frac{Y}{X}\left(c \cos\varphi + \sin\varphi \sqrt{(0{,}5X)^2 - c^2}\right),$$

где $c = 0{,}5x$.

На основе метода эллипса ниже рассмотрены различные способы вычисления фазового сдвига.

Усилители вертикального и горизонтального отклонения ЭЛО имеют, как правило, линейные фазочастотные характеристики и в первом приближении дополнительным фазовым сдвигом исследуемого сигнала в самом ЭЛО можно пренебречь. Тогда в измерительной схеме (рис. 33,*а*) фазовращатель можно отключить и подавать сигнал u_2 на вход Y непосредственно.

Методика измерения состоит в следующем. От генератора опорного сигнала напряжение u_1, начальную фазу которого принимаем

равной нулю, подается на вход X ЭЛО и на исследуемый четырехполюсник. Выходное напряжение последнего u_2 приобретает фазовый сдвиг (временную задержку) φ относительно сигнала u_1. По

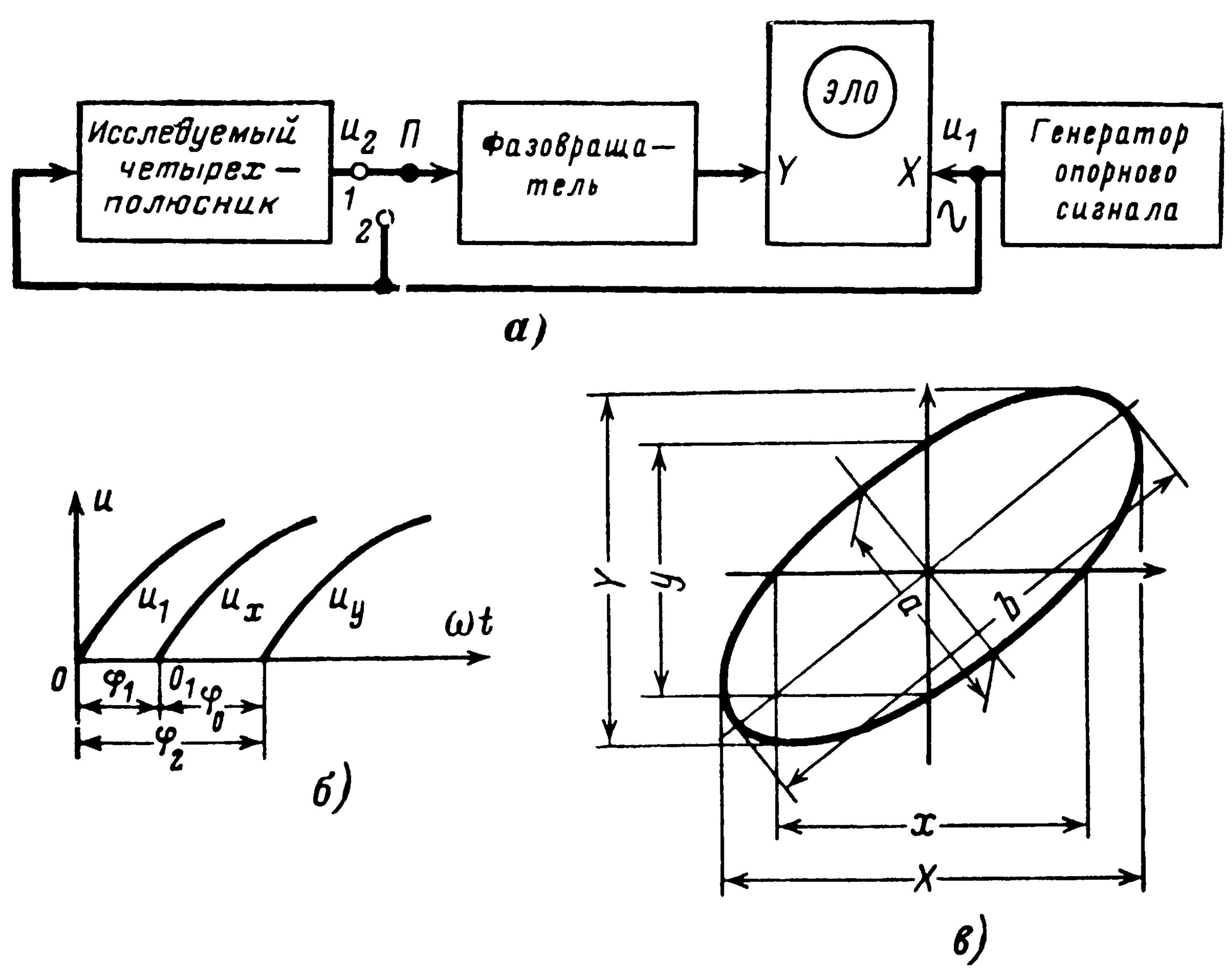


Рис. 33. Измерение фазового сдвига методом эллипса.

полученной осциллограмме (рис. 33,*в*) величину φ находят по одному из соотношений [Л. 8]:

$$\varphi = \left| \arcsin \frac{y}{Y} \right| = \left| \arcsin \frac{ab}{XY} \right|,$$

где a, b — длины малой и большой осей эллипса; X, Y — проекции эллипса на оси координат.

При равенстве напряжений разверток обоих каналов ЭЛО результат измерения подсчитывается по формулам

$$\varphi = \left| 2 \operatorname{arctg} \frac{a}{b} \right| = \left| 2 \arcsin \frac{a}{2\sqrt{2}Y} \right| = \left| 2 \arcsin \frac{b}{2\sqrt{2}X} \right|.$$

Процесс измерения можно несколько ускорить, применив специальные отсчетные устройства [Л. 2, 3].

Чтобы найти центр эллипса и определить линейные размеры Y и X на рис. 33,*в*, можно воспользоваться следующим приемом. Отключив от ЭЛО сигнал u_1 и подав на него сигнал u_2, на экране ЭЛТ получают развертку в виде вертикальной прямой, линейный размер которой равен Y. Смещением луча по вертикали совмещают середину этой прямой с центром масштабной сетки. Затем,

отключив сигнал u_2 и подав сигнал u_1, получают развертку в виде горизонтальной прямой, линейный размер которой равен X. Смещением луча по горизонтали устанавливают середину этой прямой также в центре масштабной сетки. В результате при подаче обоих сигналов центр эллипса будет находиться в середине масштабной сетки.

Метод эллипса дает возможность измерять фазовые сдвиги в пределах от 0 до 180°. Ошибка измерения величины φ обусловлена неточностью линейных измерений, конечным размером диаметра луча и высшими гармониками сигнала. Погрешность измерения достигает 2—3° при измерении фазовых сдвигов 0 или 180° и превышает 10° при измерении сдвигов порядка 90°. Если сигнал содержит высшие гармоники, величина которых составляет 2% общего напряжения, то указанные ошибки возрастают примерно на 2 и 10° соответственно [Л. 2].

При измерении фазовых сдвигов по приведенной блок-схеме фаза сигнала φ отрицательна. При замене четырехполюсника генератором знак фазы может быть различным; методика определения знака подробно изложена в [Л. 3, 8]. Частота генератора должна быть равна частоте опорного сигнала, а напряжение u_1 на его вход не подается.

Метод эллипса заметно упрощается, а точность измерения возрастает в случае, если, получив на ЭЛТ эллипс, фазовращатель перестраивать до получения нулевой фазы, т. е. до превращения эллипса в линию Результат измерения определяется по шкале фазовращателя.

Важным элементом блок-схемы измерения является фазовращатель, принцип действия которого и конкретное описание читатель сможет найти в [Л. 2, 3, 8].

В том случае, когда нужно учесть фазовый сдвиг осциллографа φ_0, найти его значение можно следующим образом. На рис. 33,*б* показаны начала временны́х диаграмм напряжений: u_1 — сигнал опорного генератора, u_x — тот же сигнал, но прошедший канал горизонтального отклонения и отставший по фазе относительно входного на угол φ_1, u_y — сигнал канала вертикального отклонения, сдвинутый относительно опорного еще больше — на угол φ_2 за счет фазовых искажений самого канала. Такое расположение сигналов объясняется тем, что фазовый сдвиг, вносимый каналом вертикального отклонения, больше, чем фазовый сдвиг, вносимый каналом горизонтального отклонения Это происходит потому, что устройство канала вертикального отклонения сложнее. Поэтому регулируемый фазовращатель подключен ко входу Y для компенсации бо́льших фазовых погрешностей.

Итак, нужно скомпенсировать, т. е свести к нулю, фазовый сдвиг φ_0 в каналах ЭЛО, для чего воспользуемся схемой рис 33,*а*, на которой переключатель *П* поставим в положение *2*. Включив генератор опорного сигнала, на ЭЛТ получим осциллограмму, близкую к той, которая показана на рис 18,*а*. Максимально усилив сигнал усилителями обоих каналов, мы получим выходящий за пределы ЭЛТ эллипс, малая ось которого a (рис 33,*в*) имеет некоторое значение. Перестраивая фазовращатель, величину этой оси можно свести к минимуму, т. е. сигнал u_y на рис. 33,*б* совместить с сигналом u_x, в результате этого началом отсчета фазового сдвига станет точка O_1. Величину φ_0 отсчитаем по шкале градуированного фазовращателя. Компенсацию следует проводить на той частоте, на которой предполагается исследовать четырехполюсник.

Проделав эти операции, переключатель *П* ставят в положение *1*, на вход *Y* ЭЛО подают сигнал u_2 и измеряют фазовый сдвиг четырехполюсника.

Применив некоторые вспомогательные устройства, процесс измерения можно облегчить, а точность измерения повысить и сде-

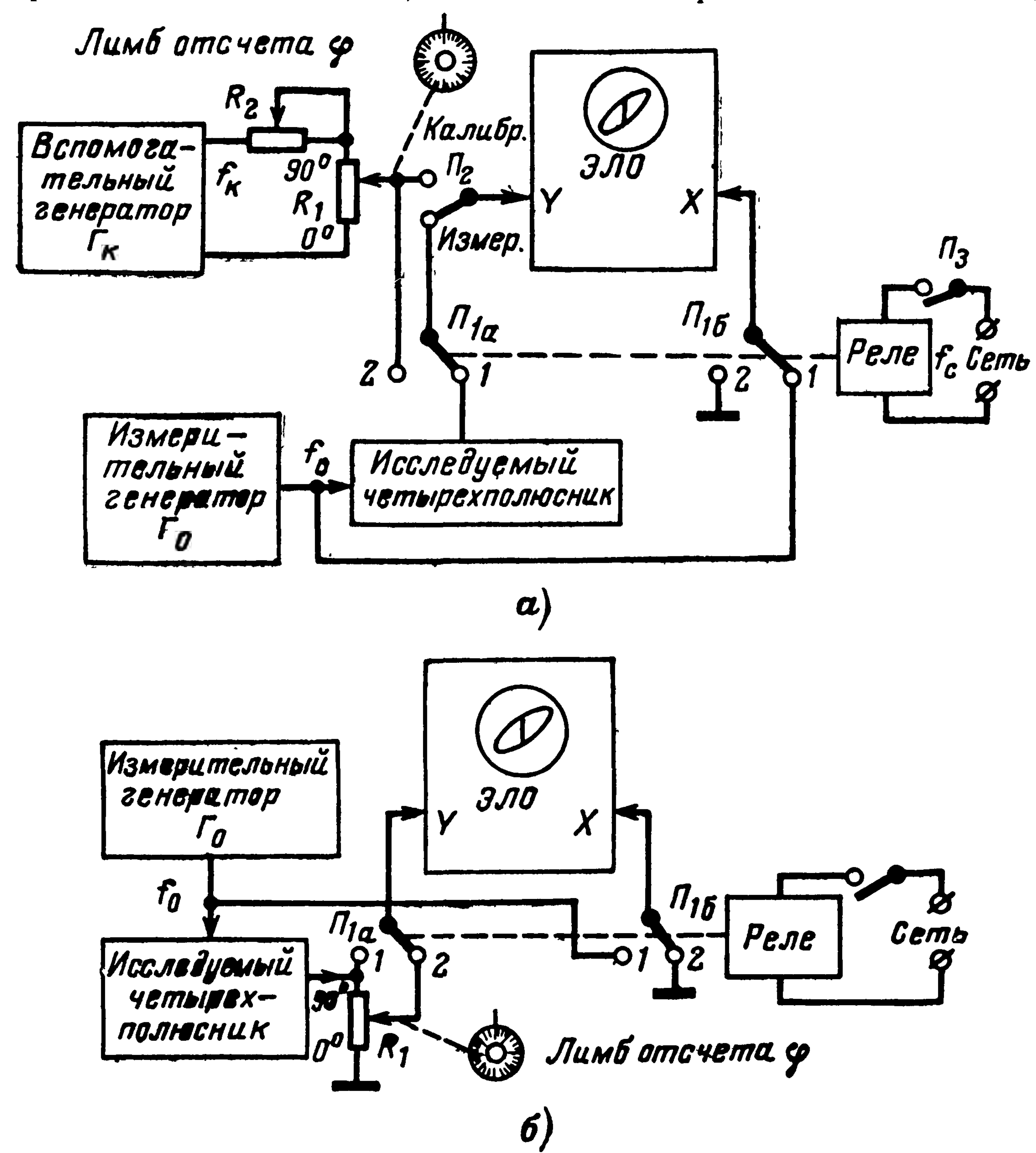


Рис. 34. Схема прямого измерения фазового сдвига.

лать его прямым, а не косвенным [Л. 13]. Это измерение основано на формуле $\varphi = \left| \arcsin \frac{y}{Y} \right|$, а исходной предпосылкой является установка размера *Y* эллипса равным некоторой постоянной величине и измерение величины *y* путем сравнения ее с напряжением $u = f(\varphi)$, которое заранее откалибровано в единицах измерения фазы (градусах или радианах).

Измерительная установка (рис. 34,*а*) состоит из следующих узлов: измерительного генератора Γ_0, задающего напряжение и частоту, на которой ведется измерение фазового сдвига; исследуемого четырехполюсника; ЭЛО с возможно бо́льшим диаметром

ЭЛТ; схемы калибровки, состоящей из вспомогательного генератора $Г_к$ и потенциометров R_1 и R_2; движок потенциометра R_1 имеет лимб отсчета его установки; реле, которое одновременно переключает контакты переключателя $П_1$.

Автоматическое переключение этих контактов можно заменить ручным, но тогда нужно использовать ЭЛО с длительным послесвечением ЭЛТ; точность измерения при этом снижается.

Калибровка лимба отсчетного устройства на частоте f_0 осуществляется при установке переключателей в следующие положения:

$П_3$ разомкнут, $П_1$ в положение *1*, $П_2$ в положение «Измерение», от входа *X* ЭЛО напряжение отключают.

В результате на вход *Y* ЭЛО подается выходное напряжение четырехполюсника и на ЭЛТ видна вертикальная линия, высота которой пропорциональна амплитуде этого напряжения. Регулировкой усиления ЭЛО высота осциллограммы *Y* устанавливается такой, чтобы занять примерно 0,8 диаметра ЭЛТ. Значение высоты измеряется по масштабной сетке.

Затем переключатель $П_2$ ставят в положение «Калибровка», а $П_1$ — в положение *2* и на вход *Y* ЭЛО будет подано напряжение калибровки от вспомогательного генератора через делитель R_1R_2. Движок потенциометра R_1 изменяют до тех пор, пока размер получаемой на ЭЛТ вертикальной линии не станет равным ранее полученному значению *Y*.

Очевидно, что снимаемое с потенциометра R_1 максимальное напряжение соответствует фазовому сдвигу 90°, а минимальное напряжение — фазовому сдвигу 0°. Калибровка промежуточных значений лимба производится в соответствии с выражением $\varphi = \left|\arcsin \frac{y}{Y}\right|$ при изменении величины *y* в пределах $0 \leq y \leq Y$. График этой функции, дающий представление о характере шкалы отсчетного устройства, приведен на рис. 35 (сплошная линия).

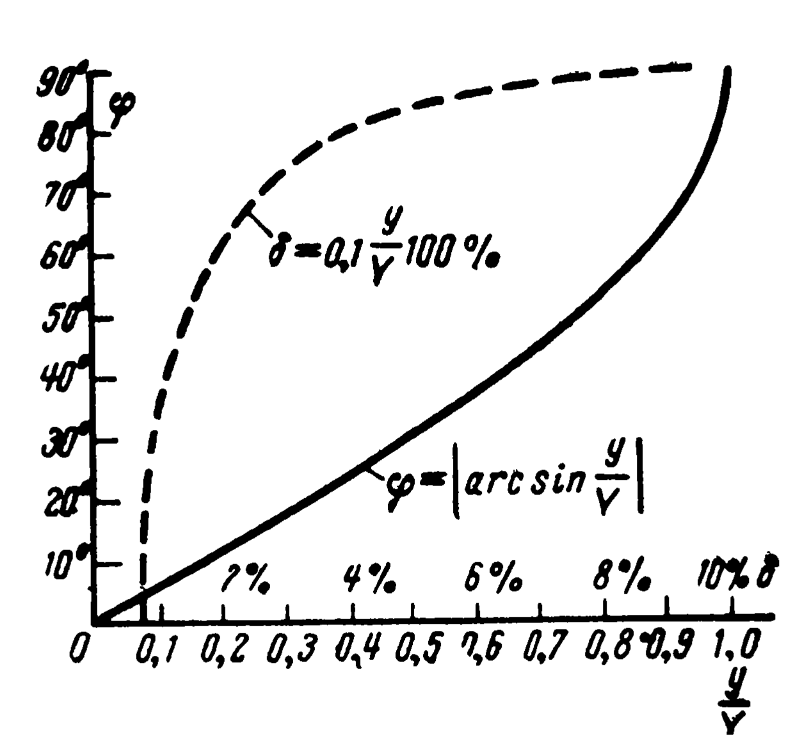


Рис. 35. Характер шкалы отсчетного устройства.

При выполнении измерения переключатель $П_{1б}$ соединяют со входом *X* ЭЛО, $П_2$ ставят в положение «Измерения» и замыкают переключатель $П_3$. Начинает работать реле, которое переключает контакты *1*, *2* переключателя $П_1$, и на ЭЛТ наблюдается эллипс, если включены контакты *1*, или вертикальная линия, если включены контакты *2*. Поскольку частота переключений 50 Гц, то на экране ЭЛТ одновременно видны обе фигуры. Усиление в канале *X* устанавливается примерно равным усилению в канале *Y*.

Вращая ось потенциометра R_1, устанавливают размер вертикальной линии равным величине *y* и по лимбу отсчетного устройства считывают значение измеряемого сдвига фаз.

По внешнему виду эллипса можно судить о том, меньше или больше ±90° искомый фазовый сдвиг. Действительно, если $\varphi > |\pi/2|$, то большая ось эллипса наклонена к горизонтальной оси под углом, который больше 90°. Тогда искомый результат определится выражением

$$\varphi = 180° - \alpha,$$

где α — отсчет по лимбу.

График изменения относительной погрешности в зависимости от величины y/Y приведен на рис. 35 (пунктирная линия).

Из графика видно, что погрешность измерения фазового сдвига, лежащего в пределах 0—75°, не превышает 3%.

Измерение фазы можно проводить и без вспомогательного генератора по схеме рис. 34,*б*, где потенциометр R_1 включен на выходе четырехполюсника как безреактивная нагрузка. При этом в положении *1* переключателя $П_1$ на ЭЛТ виден эллипс, а в положении *2* — вертикальная линия, высоту которой движком потенциометра устанавливают равной y. Нетрудно видеть, что максимальное напряжение потенциометра соответствует ±90°, а минимальное — 0°. Промежуточные значения фазового сдвига отсчетного устройства и величину фазового сдвига, большего ±90°, определяют по вышеуказанным формулам.

Основное отличие второй схемы от первой состоит в том, что в ней четырехполюсник нагружен не на входное сопротивление канала Y ЭЛО, а на промежуточную нагрузку R_1, которая может изменять истинное значение фазового сдвига. Поэтому перед измерением нужно по схеме четырехполюсника убедиться в возможности применения такой нагрузки.

Изменение усиления в каналах ЭЛО на калибровку отсчетного устройства не влияет.

Метод наложения. Метод наложения состоит в получении на экране ЭЛТ двух осциллограмм гармонических сигналов, один из которых сдвинут на некоторый фазовый угол относительно другого (рис. 32). Одно из этих напряжений, например u_1, будем считать опорным, т. е. начало отсчета фазы находится в точке a. Получив на экране ЭЛТ эти сигналы, зная линейные размеры периода ad или его половины ac и величину фазового сдвига ab, по одной из формул [Л. 2] можно найти

$$\alpha = \frac{ab}{ac} \cdot 180° = \frac{ab}{ad} \cdot 360°.$$

В случае равенства амплитуд обоих сигналов фазовый сдвиг определится выражением

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \sqrt{(A/h)^2 - 1},$$

где A и h даны в миллиметрах.

Метод наложения можно осуществить с помощью двухлучевого осциллографа или обычного осциллографа и электронного коммутатора, который поочередно подает на вход Y ЭЛО оба напряжения (рис. 36). Период напряжения развертки ЭЛО должен быть несколько больше периода исследуемого сигнала, а генератор развертки синхронизируется одним из входных напряжений.

Погрешность измерения фазового сдвига определяется ошибкой измерения линейных размеров, конечным диаметром электрон-

ного луча и несимметричностью размещения сигналов на оси времени. Желательно использовать ЭЛО с большим диаметром ЭЛТ и как можно лучшей фокусировкой луча — это повысит как точность измерения, так и разрешающую способность. Погрешность измерения при этом не более 5—7°.

Принцип действия и конкретные схемы электронных коммутаторов можно найти в [Л. 14].

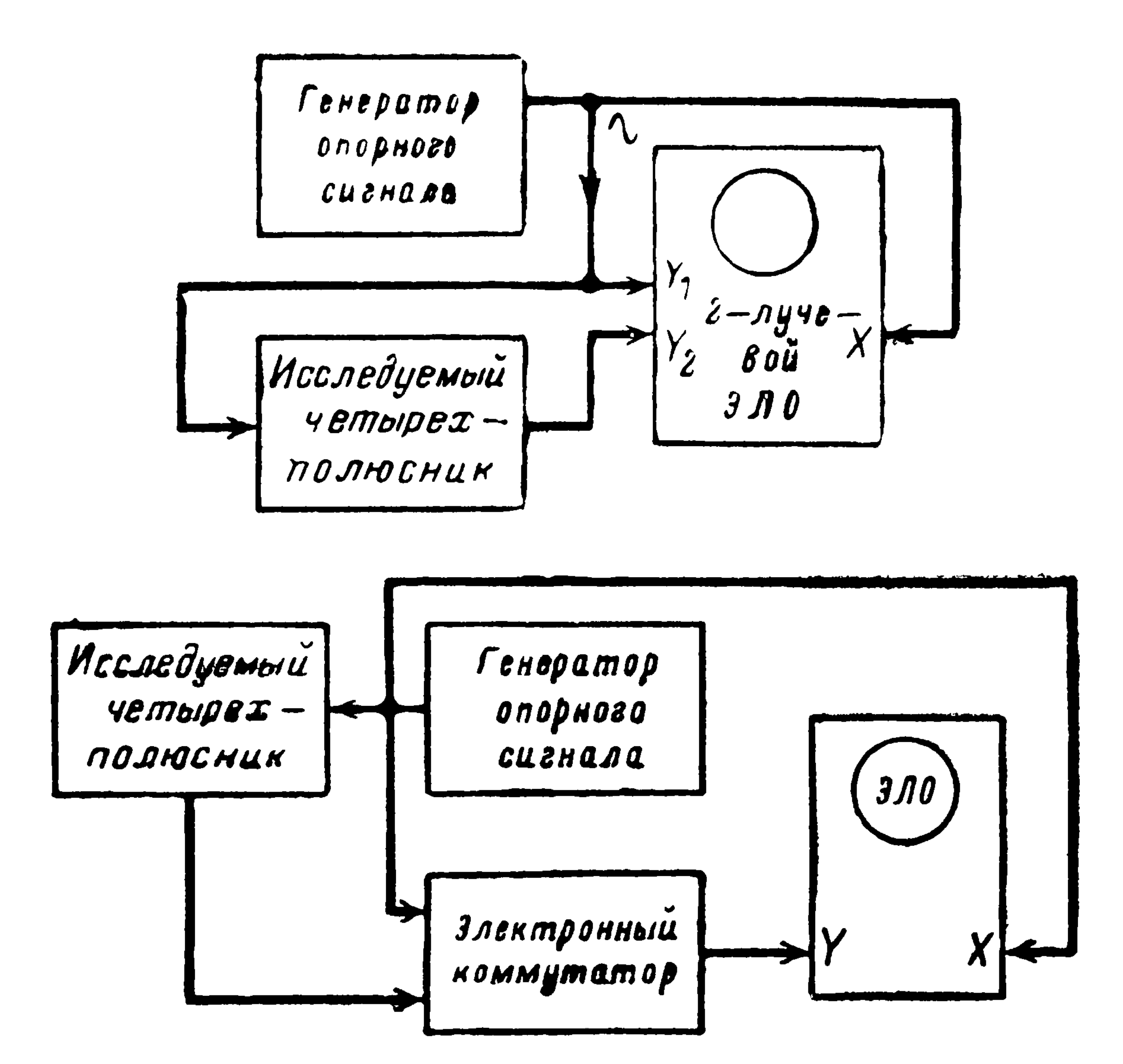


Рис. 36. Измерение фазового сдвига методом наложения.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА ВО ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ

Сущность метода, рассмотренного в [Л. 2, 3], поясняется рис. 37,*а*, на котором показаны эпюры напряжений в различных точках функциональной схемы (рис. 37,*б*) формирования импульсов, временной сдвиг между которыми прямо пропорционален сдвигу фаз между сигналами u_1 и u_2.

Из временных диаграмм нетрудно видеть, что

$$\varphi = \frac{a}{T} 360°,$$

где a и T — временные интервалы, измеренные по масштабной сетке, мм.

Приборная реализация метода представлена на рис. 38.

Все сказанное о погрешностях измерения в методе наложения относится и к этому случаю. Для повышения точности измерения, а также при измерении небольших величин φ (менее 2°) можно

применить ждущую развертку, растянув отрезок a почти на весь диаметр экрана ЭЛТ. Однако в этом случае должна быть известна длительность прямого хода ждущей развертки $T_р$ (на рис. 5,г ему

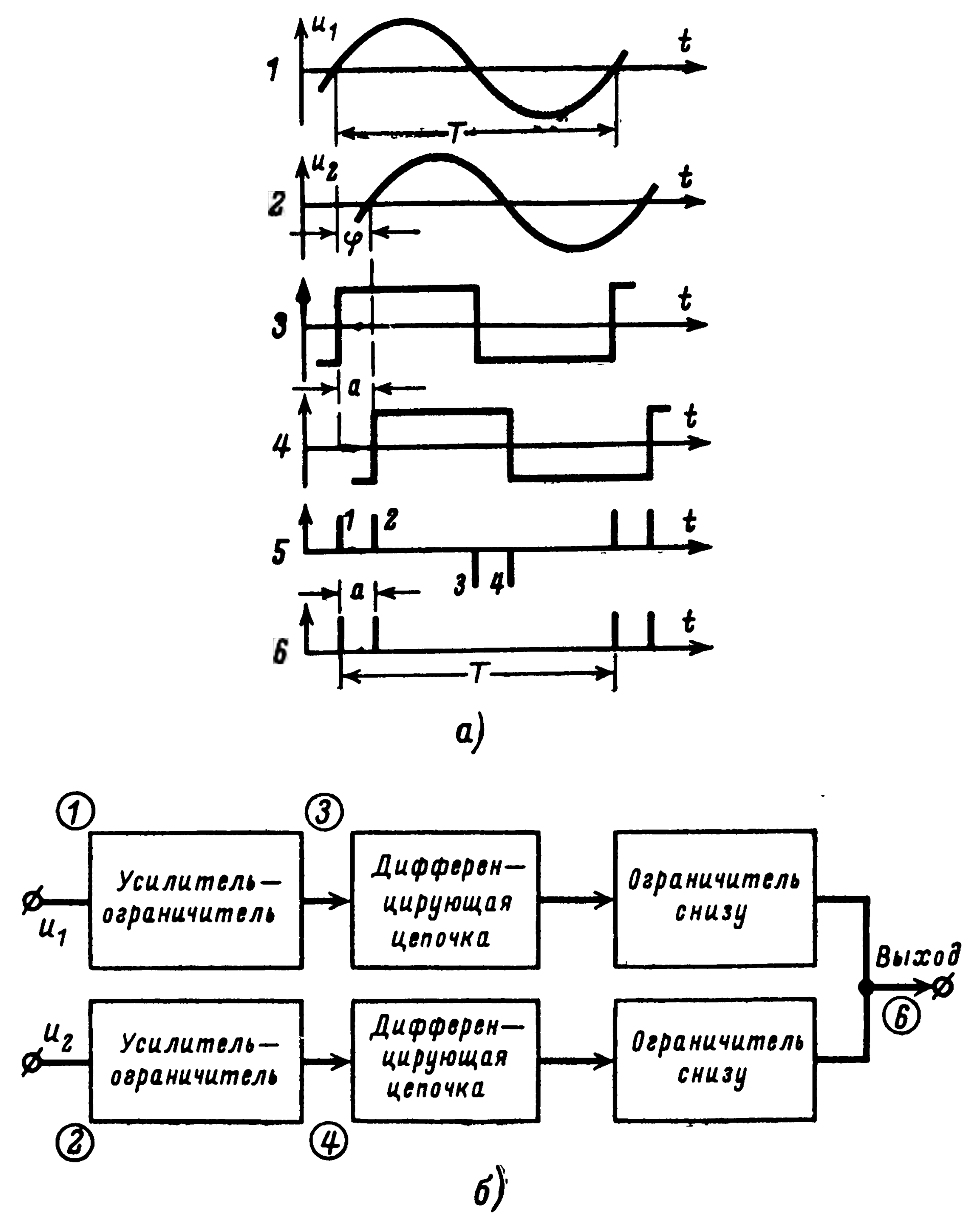


Рис. 37. Измерение фазового сдвига путем преобразования его во временной интервал.

соответствует интервал $T'_{рз}$), которая не должна превышать диаметр экрана. В этом случае

$$\varphi = \frac{T_р}{T}\frac{a}{A}360° = T_р f \frac{a}{A} 360°.$$

где $T_р$ — временная протяженность прямого хода ждущей развертки, с; T — период сигнала u_1, с; f — частота сигнала u_1, Гц; a — ли-

нейный размер фазового сдвига, мм; A — линейный размер прямого хода ждущей развертки $T_р$, мм.

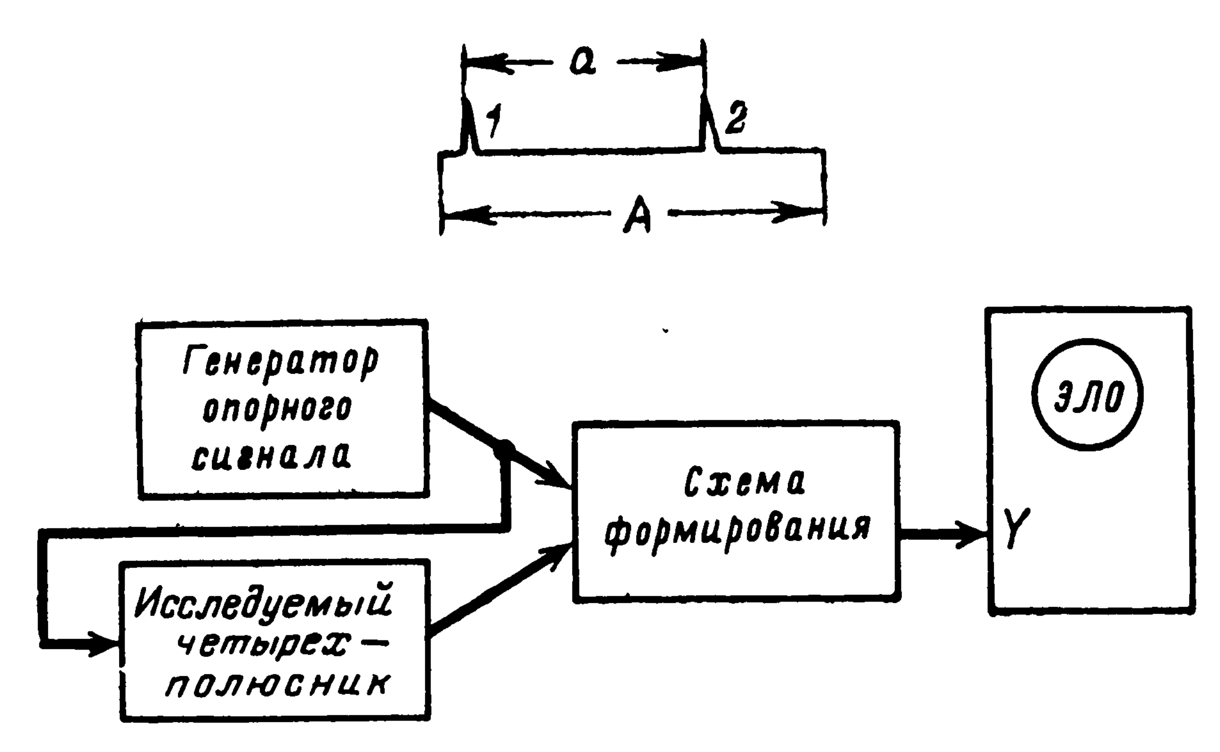


Рис. 38. Блок-схема измерения фазового сдвига путем преобразования его во временной интервал.

Круговая развертка. Длину развертки можно увеличить, если помимо перечисленной аппаратуры использовать фазорасщепитель, дающий сдвиг по фазе на 90° на частоте измерения (рис. 39,*а*).

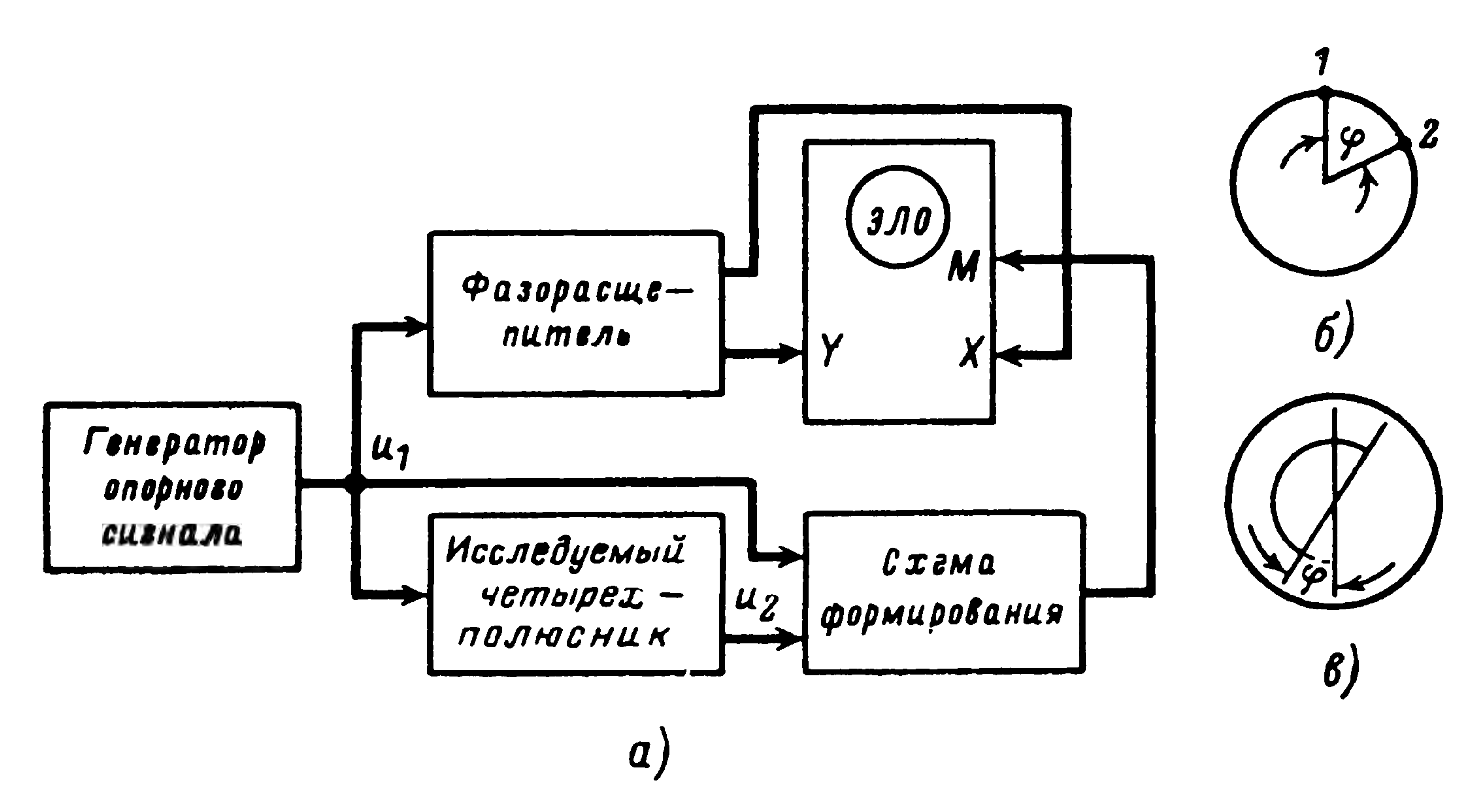


Рис. 39. Блок-схема измерения фазового сдвига при помощи круговой развертки.

С помощью фазорасщепителя на экране ЭЛТ получают круговую развертку. Одновременно напряжение u_1 подают на исследуемый четырехполюсник и схему формирования, выходной сигнал которой поступает на модулятор ЭЛТ. Поскольку развертка круговая, то интервал a между импульсами *1* и *2* (рис. 37,*а*, диаграм-

ма *б*) будет растянут значительно больше, чем при линейной развертке, что и объясняет большую точность измерения (рис. 39,*б*). Если изготовить прозрачную градусную шкалу и разместить ее перед экраном ЭЛТ, то получится фазометр с непосредственным отсчетом. Перед началом измерения нужно подать напряжение u_1 на схему формирования (сигнал u_2 не подается) и с полученной на ЭЛТ одной меткой совместить нуль шкалы отсчета фазы (точка *1* на рис. 39,*б*). Как и в предыдущих случаях, лучше применять ЭЛО с трубкой большого диаметра и хорошей фокусировкой.

С помощью круговой развертки можно измерять фазовый сдвиг и по-иному [Л. 2]. В этом случае схема формирования, состоящая из одного усилителя-ограничителя, должна вырабатывать лишь те сигналы, которые изображены на рис. 37,*а* (диаграммы *1*—*4*). Блок-схема измерения соответствует рис. 39 с той лишь разницей, что сигналы u_1 и u_2 подаются через двухполюсный переключатель поочередно на один вход схемы формирования.

Методика измерения состоит в следующем. Сначала получают круговую развертку, а затем на схему формирования подают сигнал u_1, получая на ее выходе напряжение прямоугольной формы (диаграмма *3*), которое поступает на модулятор ЭЛТ. Амплитуда этого напряжения должна быть такой, чтобы в течение отрицательного полупериода обеспечить запирание луча.

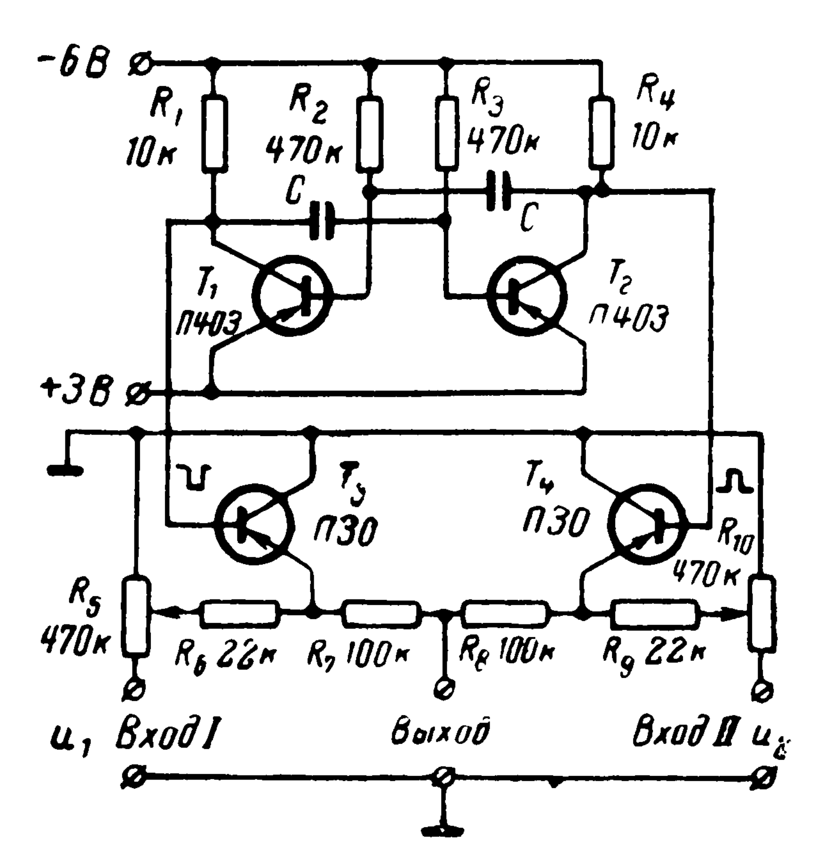


Рис. 40. Схема двухканального электронного коммутатора.

В результате на экране ЭЛТ получается светящаяся полуокружность, с диаметром которой нужно совместить начало отсчета градусной шкалы. Отключив сигнал u_1 от схемы формирования, подают на нее сигнал u_2. Поскольку это напряжение сдвинуто по фазе относительно опорного (диаграмма *4*), то на экране ЭЛТ получается полуокружность, повернутая относительно исходной на угол φ (рис. 39,*в*). Отсчитав его величину по градусной шкале, получают результат измерения.

В заключение остановимся на некоторых вспомогательных устройствах.

Электронный коммутатор [Л. 14]. Электронный коммутатор используется для получения двух и более осциллограмм сигналов различных источников на обычном ЭЛО. В частности, его можно применять при измерении фазовых сдвигов, коэффициента усиления, сравнении частот и других измерениях с помощью осциллографа. Рассмотрим одну из несложных схем двухканального электронного коммутатора (рис. 40).

Коммутатор собран на четырех транзисторах T_1—T_4 и состоит из входного устройства, генератора коммутирующих импульсов и переключающего устройства.

Входное устройство (резисторы R_5—R_{10}) обеспечивает подключение и регулировку величины входных сигналов.

Генератор коммутирующих импульсов, собранный по схеме симметричного мультивибратора на транзисторах T_1, T_2, вырабатывает прямоугольные импульсы, которые управляют работой переключающего устройства. Транзисторы мультивибратора включены по схеме с общим эмиттером и работают в режиме непрерывных колебаний.

Емкость конденсатора C, найденная из выражения

$$C = \frac{1}{1{,}4 R_б f_п},$$

где $R_б$ — сопротивление в цепи базы; $f_п$ — частота переключения входных сигналов, определяет частоту переключения коммутируемых напряжений.

Например, если $f_п = 1$ кГц, то $C = 1500$ пФ при $R_б = 470$ кОм. Применение в схеме мультивибратора транзисторов типа П403 позволяет получить при различных емкостях C частоту переключения порядка 100 кГц.

Переключающее устройство, собранное на транзисторах T_3, T_4, под воздействием импульсов мультивибратора поочередно подключает входы коммутатора ко входу Y ЭЛО. Устройство состоит из двух триодных ключей с общим коллектором, работающих на нагрузку из резисторов R_7, R_8.

Электронный коммутатор работает следующим образом. С нагрузок мультивибратора (резисторы R_1, R_4) на базы транзисторов T_3 и T_4 одновременно подается последовательность разнополярных импульсов, которые поочередно их запирают или отпирают: когда один из транзисторов заперт, то другой отперт. Положим, что в какой-то момент времени на базу транзистора T_3 подан отрицательный импульс, а на базу транзистора T_4 — положительный. В результате транзистор T_3 будет отперт (его сопротивление мало) и входное напряжение u_1 на выход коммутатора, т. е. в канал Y ЭЛО, не подается. Транзистор T_4 в это время заперт (его сопротивление велико), входное напряжение u_2 поступает на выход коммутатора и будет видно на ЭЛТ.

В следующий полупериод полярность импульсов на базах переключающего устройства меняется и на ЭЛТ будет виден сигнал u_1. Поскольку частота переключения входных напряжений равна 1000 Гц, то на ЭЛТ мы будем наблюдать оба сигнала одновременно.

Коммутатор питается от батарей. Рекомендуется генератор развертки синхронизировать одним из исследуемых сигналов.

Формирующее устройство [Л. 15]. Преобразование гармонического колебания в прямоугольное можно осуществить с помощью формирователя (рис. 41), который состоит из входного эмиттерного повторителя (транзистор T_1), усилителя (транзистор T_2), собственно формирователя прямоугольного напряжения (триггер Шмидта на транзисторах T_3 и T_4) и выходного эмиттерного повторителя (транзистор T_5).

Преобразуемое напряжение в зависимости от частоты подается на «Вход I» (частота сигнала от единиц герц до 100 кГц) или на «Вход II» (максимальная частота сигнала 750 кГц). Режим работы входного эмиттерного повторителя определяется резисторами R_1 и R_4, а обратная связь через конденсатор C_2 повышает входное сопротивление повторителя по переменному току.

Входное синусоидальное напряжение, усиленное усилителем на транзисторе T_2, уменьшаясь, проходит нижний уровень опрокидывания триггера, в результате чего транзистор T_3 резко отпирается, а транзистор T_4 — запирается. Такое устойчивое состояние сохраняется до тех пор, пока увеличивающееся напряжение входного сигнала не достигает верхнего уровня срабатывания. Как только этот

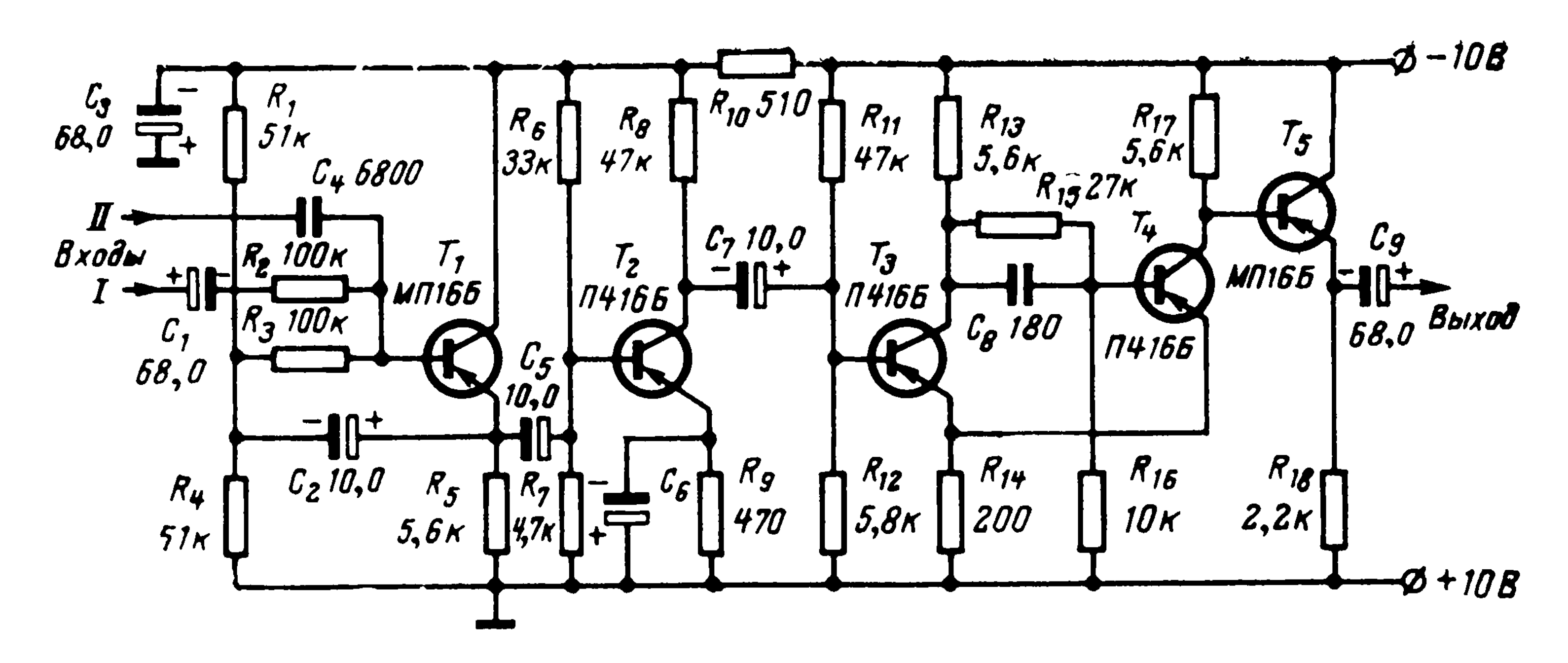


Рис. 41. Схема формирующего устройства.

уровень будет достигнут, произойдет новое опрокидывание триггера в другое состояние равновесия — транзистор T_3 запирается, а транзистор T_4 отпирается. Таким образом из гармонического сигнала формируется прямоугольное напряжение.

Конденсатор C_8, включенный параллельно резистору R_{15}, сокращает время переброса триггера из одного устойчивого состояния в другое. Основные достоинства триггера Шмидта заключаются в способности поддерживать неизменной амплитуду и длительность фронта выходного напряжения в широком диапазоне частот.

Для согласования формирователя с нагрузкой служит выходной эмиттерный повторитель.

Амплитуда входного напряжения может находиться в пределах 20 мВ—20 В. Длительность фронта выходных импульсов не превышает 0,5 мкс.

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ТОКА И МОЩНОСТИ

Измерение напряжения. Даже если в ЭЛО нет калибратора напряжения, его все равно можно использовать в качестве вольтметра, предварительно откалибровав масштабную сетку. При этом можно измерять любое мгновенное значение напряжения [Л. 4].

Блок-схема калибровки приведена на рис. 42. Источником гармонического сигнала может быть как плавно регулируемое напряжение сети, так и напряжение звукового генератора. Контролировать напряжение можно любым ламповым вольтметром; лучше использовать вольтметр типа ВЗ-20, который имеет широкий диапазон измерения напряжений.

Калибровку масштабной сетки производят в следующем порядке. Установив в какое-либо определенное положение потенциометр регулировки усиления канала Y, на вход ЭЛО от генератора

подают такое напряжение, которое отклонит луч на одну клетку масштабной сетки вверх и вниз (всего на две клетки). Измерив величину этого напряжения вольтметром, изменяют сигнал генератора настолько, чтобы луч отклонился вверх и вниз на две клетки (всего на четыре), снова отмечают величину соответствующего напряжения и т. д. Такую градуировку следует делать примерно в пределах $^3/_4$ диаметра ЭЛТ.

Полученные данные наносят на масштабную сетку или составляют график зависимости величины отклонения луча (в одну сторону) от измеренного напряжения.

Важно обратить внимание на следующие особенности. Перед началом измерения луч ЭЛТ должен быть хорошо сфокусирован и

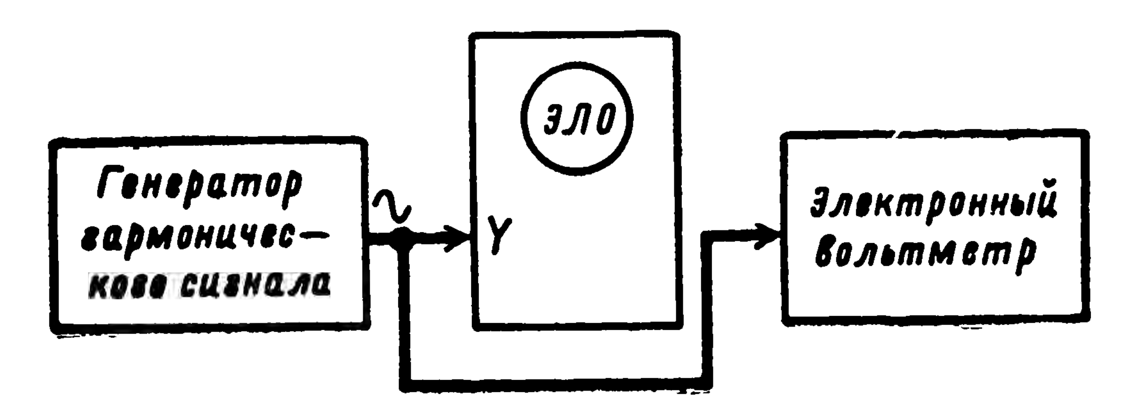


Рис. 42. Блок-схема калибровки масштабной сетки ЭЛТ.

находиться в центре экрана. Не следует забывать, что на экране ЭЛТ виден полный размах калибровочного напряжения, а показания вольтметра соответствуют отклонению луча лишь в одну сторону от центра. При калибровке развертку ЭЛО можно и не включать.

Поскольку шкалы индикаторов вольтметров обычно градуируют в действующих значениях, а в дальнейшем предполагается измерять мгновенные или амплитудные значения напряжения, то подготовляемую сетку (график) следует сразу же пересчитать в амплитудные значения. Если предстоит измерять напряжение синусоидальной формы, то калибровку можно оставить в действующих значениях, но отсчеты по масштабной сетке снимать лишь те, которые соответствуют одинарной амплитуде измеряемого напряжения.

Ошибка измерения в этом случае определяется погрешностью самого вольтметра (около $\pm 3\%$), точностью определения линейных размеров осциллограммы и диаметром луча ЭЛТ. Таким образом, общая погрешность измерения напряжений может достигнуть величины $\pm 7\%$. Особое внимание следует обратить на фиксацию положения масштабной сетки — это относится ко всем случаям ее применения.

Указанные графики изготовляются для нескольких определенных значений усиления канала *Y*. Аналогичным же образом изготовляют сетку (график) и для измерения напряжений, подаваемых на пластины ЭЛТ непосредственно.

Для измерения пикового значения напряжений импульсной формы с высокой точностью (порядка долей процента) применяют компенсационный метод (рис. 43). Поскольку измеряемое и компенсирующее напряжения должны подаваться на пластины ЭЛТ непо-

средственно (минуя усилитель), то, очевидно, измерять этим способом можно напряжения порядка сотен вольт.

Методика измерения состоит в следующем. Отключив источник постоянного напряжения (ИПН) и установив переключатели $П_1$ и $П_2$ в положение *2*, устанавливают луч в каком-либо определенном положении, например в центре экрана (точка *О*). Затем на эту пластину подают измеряемое периодическое импульсное напряжение. Поскольку импульсы имеют положительную полярность, то под их воздействием луч отклонится вверх на некоторую высоту.

Затем к нижней пластине подключают ИПН (переключатели $П_1$ и $П_2$ в положении *1*). Так как его напряжение положительно, то оно будет стремиться отклонить луч вниз, т. е. компенсировать смещение, вызванное измеряемым напряжением.

Регулируя величину напряжения ИПН, совмещают верхний конец импульса (точка *А*) с исходной точкой *О*. Величину этого напряжения отсчитывают по шкале вольтметра постоянного напряжения высокой точности. Так же измеряют амплитуду импульсов отрицательной полярности: надо лишь изменить полярность напряжений ИПН и вольтметра. При этих измерениях напряжение развертки на горизонтально-отклоняющие пластины можно не подавать.

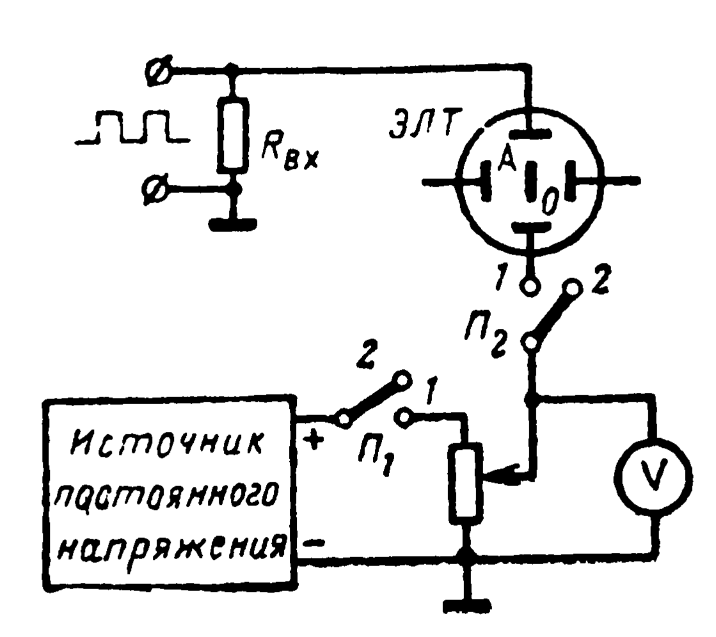


Рис. 43. Измерение напряжения методом компенсации.

Этим же способом можно измерить и синусоидальное напряжение. Для этого нужно установить луч ЭЛТ по масштабной сетке в центре экрана, а компенсирующее напряжение должно быть равно амплитуде измеряемого напряжения. Смещать осциллограмму можно в любую сторону, так как полярность ИПН не важна.

Достоинство этого метода в том, что им можно измерять напряжения колебаний таких частот, на которых вольтметры переменного тока уже не работают.

Измерение тока. Измерение тока сводится к измерению напряжения, создаваемого этим током на резисторе. Рассмотрим такой пример [Л. 4]. В каскаде усилителя низкой частоты нужно определить величину анодного тока и найти зависимость его изменения во времени $i_а=f(t)$ при подаче на вход каскада переменного напряжения. Для этого в анодную цепь лампы (рис. 44) включают дополнительный резистор R_4, величина которого должна быть значительно меньше резистора R_3, чтобы не нарушать работу схемы. Например, если резистор R_4 будет в 100 раз меньше резистора R_3, то погрешность измерения тока будет порядка 1%.

Для получения зависимости $i_а=f(t)$ получают осциллограмму сигнала и, измерив мгновенные значения напряжения в нескольких точках вдоль линии развертки, рассчитывают ток, после чего строят график искомой зависимости.

Измерение мощности. Один из способов измерения мощности [Л. 3] состоит в следующем. Например, нужно измерить мощность, потребляемую каким-либо полным сопротивлением *Z*, с реактивной

составляющей, имеющей емкостный или индуктивный характер (рис. 45,*а*). Если сопротивление Z имеет емкостный характер, то последовательно с ним включают конденсатор C, величину которого выбирают такой, чтобы на частоте измерения его реактивное сопротивление X_c было меньше Z.

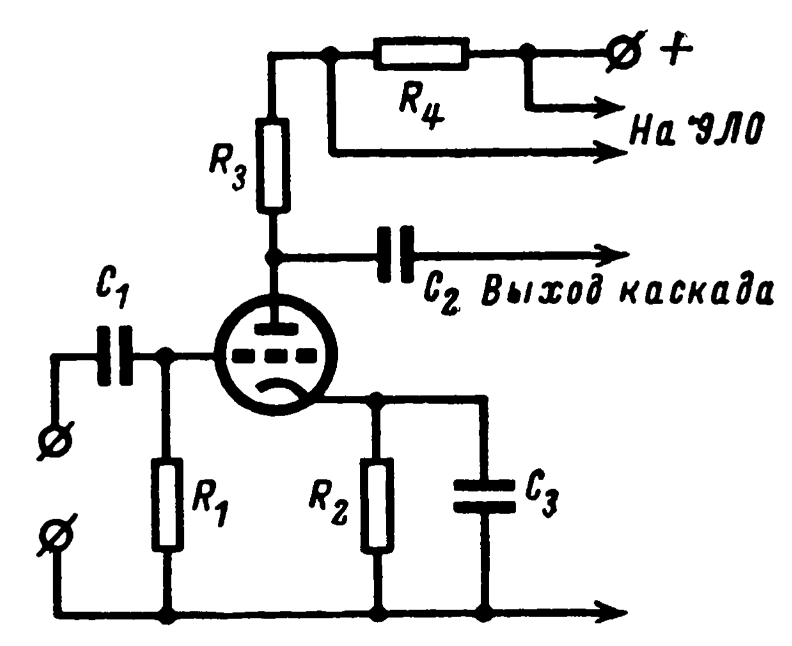


Рис. 44. Измерение тока при помощи ЭЛО.

На вход Y ЭЛО подают напряжение с исследуемого сопротивления Z, на вход X — со вспомогательного конденсатора C. На экране получают осциллограмму в виде фигуры, показанной на рис. 45,*б*. Искомую мощность, выделяющуюся на сопротивлении Z, находят из соотношения

$$P=SCfk,$$

где f — частота подводимого напряжения; S — площадь осциллограммы, которую проще всего подсчитать по миллиметровке, перенеся на нее фигуру; k — коэффициент, учитывающий усиление каналов ЭЛО.

Для облегчения расчетов рекомендуется предварительно вычислить коэффициент пропорциональности $k=Cf$. Для этого вместо

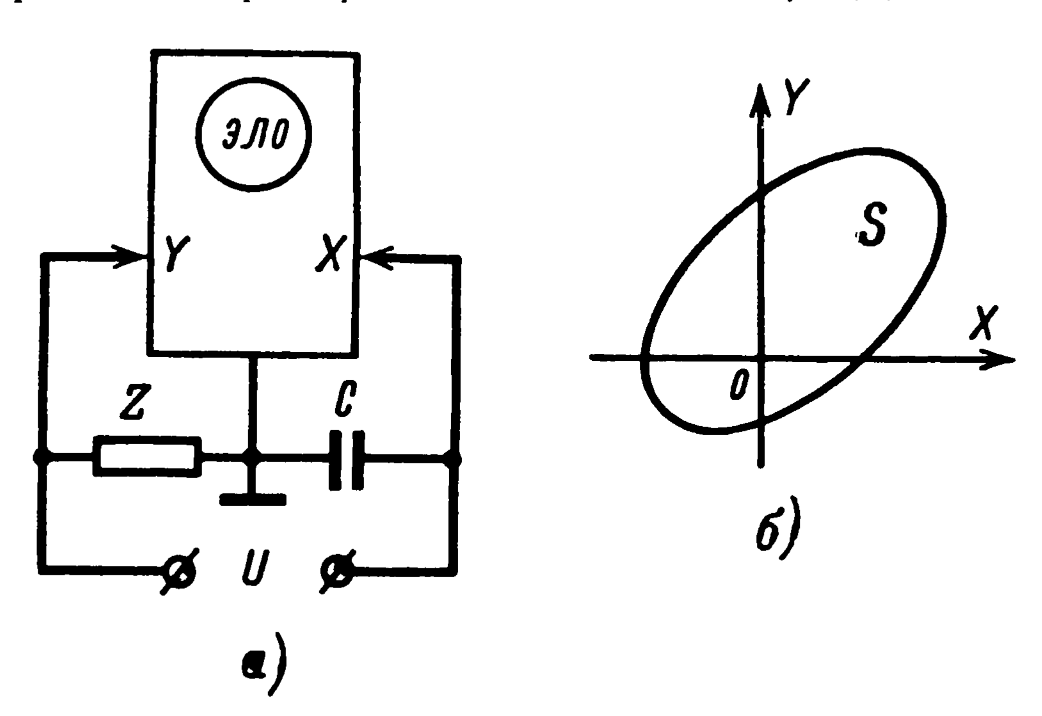


Рис. 45. Измерение мощности при помощи ЭЛО.

исследуемого сопротивления Z включают резистор R, соизмеримый с величиной Z, и, измерив с помощью ЭЛО падение напряжения на нем (вертикальный размер фигуры), вычисляют мощность P_0, которая пропорциональна площади S_0:

$$P_0=kS_0,$$

где S_0 — площадь фигуры на ЭЛТ, полученная при подключении резистора R. Затем вычисляют:

$$k=P_0/S_0.$$

После этого, не меняя положения органов регулировки усиления обоих каналов ЭЛО, включают исследуемое сопротивление Z, вычисляют площадь фигуры S и определяют искомую мощность P.

Например, при известной величине резистора R мощность $P_0=700$ мВт, площадь $S_0=14$ см², а коэффициент $k=700:14=$ $=50$ мВт/см²; при $S=11,2$ см² мощность, выделяющаяся на сопротивлении Z, будет равна:

$$P=kS=50\cdot 11,2=560 \text{ мВт}.$$

Этот способ следует применять в том случае, когда цепочку питают напряжением синусоидальной формы, при высоких частотах питающего сигнала и маломощных источниках напряжения. Погрешность измерения мощности зависит от точности определения коэффициента k, правильности подсчета площади осциллограммы и различия фазовых характеристик усилителей каналов ЭЛО, достигая $\pm(10\div15)\%$.

ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛОВ И ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОСХЕМ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОСХЕМ

Частотной характеристикой радиоустройства (четырехполюсника) называют зависимость амплитуды и фазы его выходного напряжения от частоты. Первая характеристика называется амплитудно-частотной (АЧХ) или амплитудной, а вторая — фазо-частотной (ФЧХ) или фазовой; когда обе характеристики снимаются одновременно, то результат называют амплитудно-фазовой частотной характеристикой (АФЧХ) или комплексным коэффициентом передачи.

Аналитическая запись АФЧХ обычно дается в виде

$$\dot{K}(j\omega)=K(\omega)\,e^{j\varphi(\omega)},$$

где $K(\omega)=U_2/U_1$ — модуль комплексного коэффициента передачи или АЧХ; U_2 — амплитуда выходного напряжения четырехполюсника; U_1 — амплитуда входного напряжения четырехполюсника; $\varphi(\omega)=\varphi_2(\omega)-\varphi_1(\omega)$ — аргумент комплексного коэффициента передачи или ФЧХ; $\varphi_1(\omega)$ — начальная фаза входного напряжения; $\varphi_2(\omega)$ — начальная фаза выходного напряжения.

С помощью ЭЛО можно снимать АЧХ, что делается наиболее часто, ФЧХ и АФЧХ.

Получение АЧХ. Для получения на ЭЛТ амплитудно-частотной характеристики применяют специальные приборы — измерители частотных характеристик, например, типов Х1-7, Х1-19, Х1-30 и т. п. Когда такой аппаратуры нет, можно воспользоваться методом, который продемонстрируем на примере получения АЧХ резонансной колебательной системы.

Эту характеристику можно снять, используя блок-схему, состоящую из генератора качающейся частоты (ГКЧ), детектора с низкочастотным усилителем и ЭЛО (рис. 46).

Генератор качающейся частоты — это высокочастотный генератор частотно-модулированных гармонических колебаний (свип-генератор); его частота под воздействием модулирующего сигнала изменяется в пределах от некоторого минимального $f_н$ до некоторого

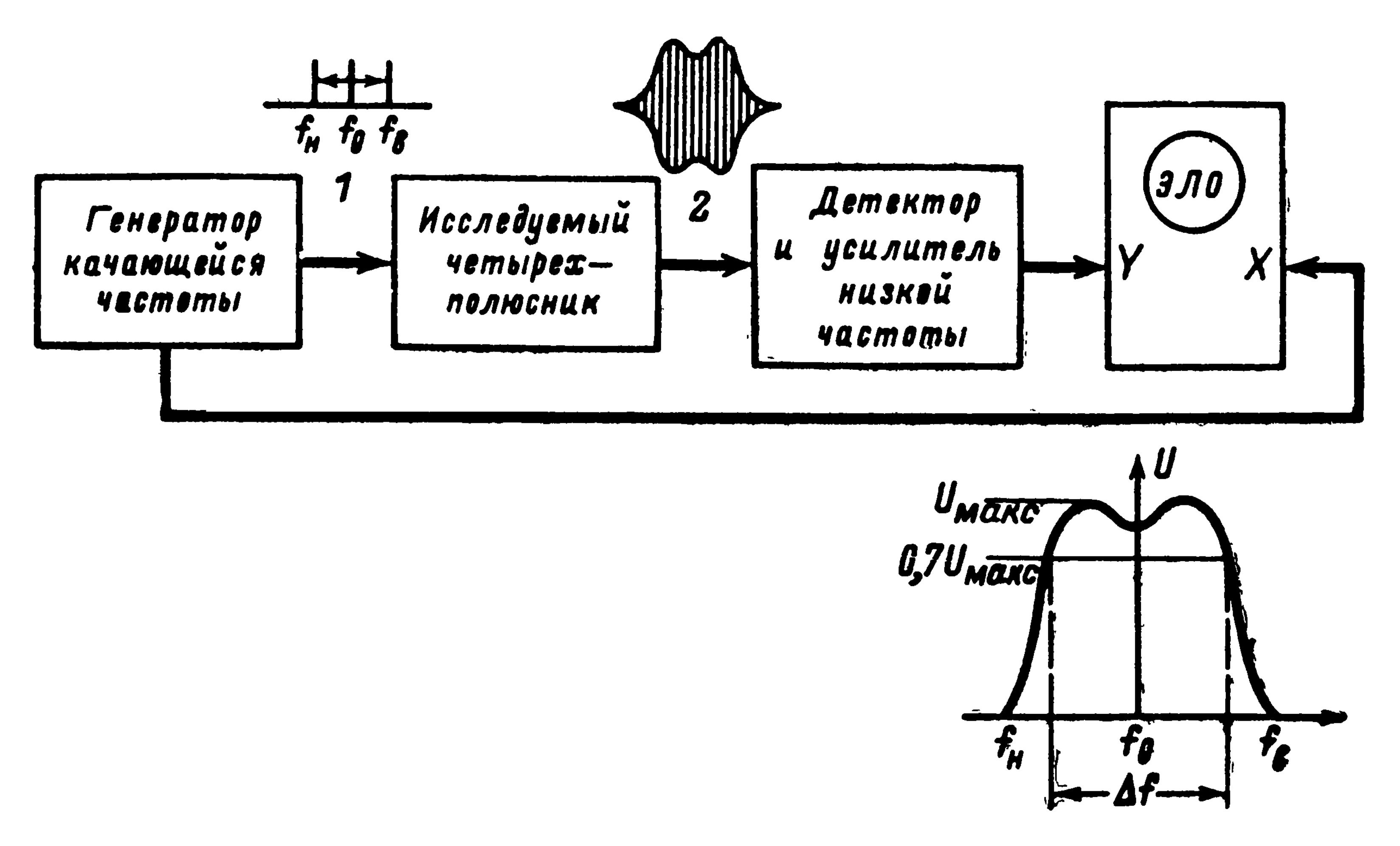


Рис. 46. Блок-схема измерения АЧХ.

максимального $f_в$ значений. Кроме того, средняя частота генератора f_0 должна перестраиваться в довольно широком диапазоне.

Например, для получения АЧХ усилителя промежуточной частоты (УПЧ), настроенного на частоту $f_р=465$ кГц, полоса пропускания которого $\Delta f=10$ кГц, необходимо, чтобы средняя f_0 частота ГКЧ равнялась $f_р$, $f_н=450$ кГц, $f_в=480$ кГц. Таким образом, диапазон изменения частоты f_0 (диапазон качания или девиация частоты) составляет ± 15 кГц. Частота этого изменения может быть небольшой: порядка 50—1000 Гц. Обычно максимальная девиация в ГКЧ составляет $\pm(10 \div 20)$ % от f_0, а диапазон перестройки определяется его назначением. Более полные сведения о ГКЧ можно найти в [Л. 3, 9].

Сигнал ГКЧ, пройдя через четырехполюсник, изменяет свою амплитуду в соответствии с его АЧХ, т. е. оказывается «промодулированным» по амплитуде. Огибающая этого сигнала, соответствующая АЧХ колебательной системы, выделяется детектором.

В тех случаях, когда средняя частота f_0 с учетом девиации укладывается в полосу пропускания канала вертикального отклонения ЭЛО, детектор можно не применять и на ЭЛТ будет наблюдаться сигнал, соответствующий временно́й диаграмме *2* на рис. 46. Усилитель также не нужен, если с четырехполюсника снимается сигнал достаточной амплитуды Тем не менее детектор и усилитель делают осциллограмму АЧХ более наглядной.

Генератор развертки ЭЛО синхронизируют напряжением той частоты, с которой происходит изменение средней частоты f_0 ГКЧ. При этом изменение частоты f_0 от $f_н$ до $f_в$ и перемещение луча ЭЛТ происходит по одному (линейному) закону, т. е. горизонтальная ось на экране ЭЛТ становится осью частот.

Предположим, что нужно настроить УПЧ на частоту 465 кГц. Для этого необходимо установить среднюю частоту ГКЧ равной 465 кГц при ее девиации на ±5% (±23 кГц). Поскольку девиация частоты происходит по линейному закону, то на получаемой осциллограмме по горизонтальной оси частотный диапазон составит 46 кГц.

Полосу пропускания УПЧ определяют, наложив на ЭЛТ масштабную сетку и определив цену ее горизонтального деления. Проделав это, оценивают ширину полосы пропускания на уровне 0,7 максимального значения. Откалибровав ту же сетку по вертикали в единицах напряжения и зная величину выходного напряжения ГКЧ, можно ориентировочно определить коэффициент усиления УПЧ.

Получение ФЧХ. Выше были рассмотрены методы измерения фазовых сдвигов. Теперь остановимся на методике измерения фазочастотной характеристики устройства, т. е. зависимости фазового сдвига от частоты, для чего можно применить любой из описанных методов измерения фазы.

Прежде чем собрать измерительную схему, нужно знать, в каком диапазоне частот будет сниматься характеристика, т. е. знать полосу пропускания исследуемого устройства, а также выбрать такой уровень опорного сигнала, чтобы четырехполюсник не вносил нелинейных искажений.

Зная эти параметры, собирают измерительную схему и, убедившись в ее работоспособности, снимают фазовую характеристику, предварительно определив фазовую характеристику самого осциллографа. Фазо-частотную характеристику четырехполюсника определяют теми значениями фазового сдвига, которые измерены в выбранном частотном диапазоне.

С помощью ЭЛО можно найти модуль и фазу АФЧХ одновременно. Устройство, которое служит для этой цели, называют векторметром и в одном из вариантов он имеет следующую блок-схему (рис. 47,*а*).

На входы схемы подаются два гармонических колебания одной частоты: опорное $u_1 = U_{м1} \sin \omega t$ и с выхода четырехполюсника — измеряемое $u_2 = U_{м2} \sin(\omega t - \varphi)$. Опорное напряжение преобразуется однополупериодным детектором и поступает на схему запуска и на вход *X* ЭЛО. В результате на ЭЛТ получают горизонтальную прямую, исходящую из центра трубки к периферии. Длина этой прямой пропорциональна амплитуде опорного напряжения. Эта радиальная прямая будет служить началом отсчета фазового сдвига (аргумента комплексного коэффициента передачи) и задавать масштаб модуля коэффициента передачи. В схеме запуска из выпрямленного напряжения вырабатываются короткие периодические импульсы для запуска ждущего мультивибратора

Ждущий мультивибратор под их воздействием выдает импульсы, частота следования которых равна частоте напряжения u_1, длительность составляет 1/360 часть периода, а расположение их соответствует началам синусоиды. Импульсы поступают на две схемы совпадения.

Измеряемое напряжение u_2 подается на одну схему совпадения и через фазовращатель (сдвиг на 90°), который обеспечивает равенство амплитуд входных и выходных сигналов, на другую схему совпадения:

$$u_y = u_2 = U_{м2} \sin(\omega t - \varphi), \quad u_x = U_{м2} \cos(\omega t - \varphi).$$

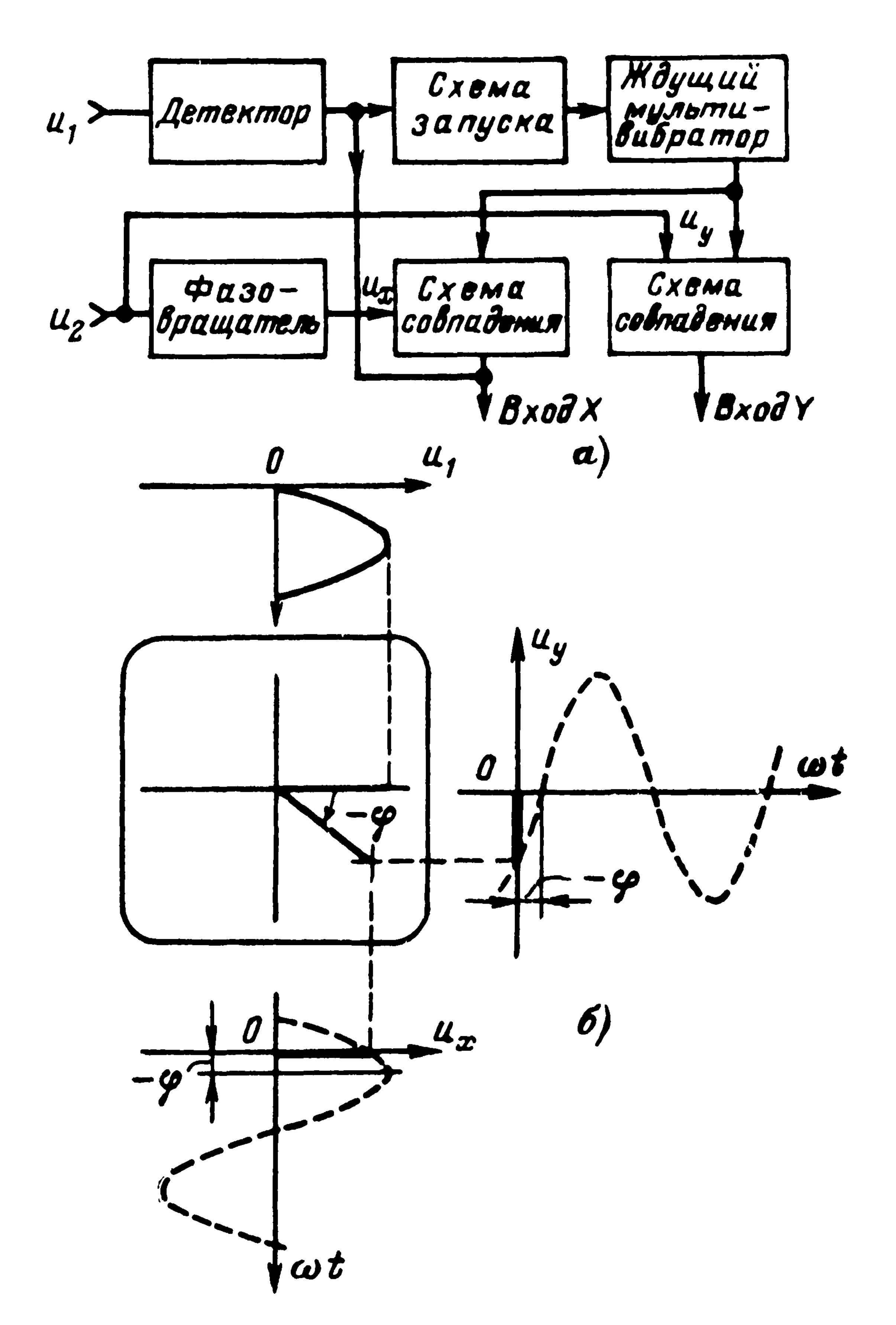


Рис. 47. Функциональная схема векторметра.

Схемы совпадения в момент поступления импульсов мультивибратора выдают импульсы той же длительности, у которых амплитуды равны мгновенному значению напряжений u_y и u_x.

В результате взаимодействия этих импульсов на ЭЛТ появляется вторая радиальная линия, амплитуда которой равна модулю АФЧХ, а ее смещение относительно опорной прямой равно аргументу АФЧХ, т. е. фазовому сдвигу напряжения u_2.

На рис. 47,*б* над изображением ЭЛТ показано напряжение опорного сигнала u_1, справа от него — сигнал u_y, а под ним — сигнал u_x. На них нанесены изображения импульсов, которые выдаются схемами совпадений. На ЭЛТ видны радиальные прямые: горизонтальная линия, пропорциональная опорному напряжению u_1, и линия, сдвинутая относительно нее на угол φ и пропорциональная модулю сигнала u_2.

Очевидно, что масштабную сетку ЭЛТ нетрудно откалибровать по амплитуде и фазе и с ее помощью отсчитывать измеряемые значения. Частотный диапазон векторметра определяется схемами его блоков, а погрешность измерения модуля и аргумента составляет $\pm(10\div15)\%$.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ ПРИ ПОМОЩИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СИГНАЛА

Если сигнал имеет спектр более широкий, чем полоса пропускания четырехполюсника, то форма сигнала на его выходе будет отличаться от первоначальной. Нелинейность фазовой характеристики четырехполюсника также искажает форму выходного сигнала.

Это свойство используют для приближенной оценки АЧХ и ФЧХ четырехполюсников путем подачи на них периодической последовательности импульсов прямоугольной формы («меандр») и сопоставления формы входных и выходных сигналов.

При таких испытаниях к генератору импульсного напряжения предъявляются следующие требования: фронт импульсного напряжения должен быть по крайней мере в 2 раза меньше постоянной времени входной цепи четырехполюсника; частота следования импульсов должна регулироваться в широких пределах (от нескольких герц до нескольких десятков килогерц); импульсное напряжение должно иметь горизонтальную плоскую вершину с отклонением не более чем на один процент.

При испытаниях четырехполюсник должен быть нагружен на согласованную нагрузку.

Важным следствием применения прямоугольного сигнала является то, что если через четырехполюсник этот сигнал проходит удовлетворительно, то сигналы другой формы с более узким спектром исказятся меньше.

Электрическая схема четырехполюсника обычно содержит большое количество *RC*-цепочек, соединенных в различных комбинациях, которые ограничивают спектр испытательного сигнала. Эти цепочки могут быть сведены к двум основным схемам: фильтр высоких частот или дифференцирующая цепь (рис. 48,*а*) и фильтр низких частот или интегрирующая цепь (рис. 48,*б*).

Пусть исследуется какой-либо усилитель, АЧХ которого неизвестна. Нужно оценить ее лишь качественно, а также иметь представление о фазовых искажениях. Для этого собирают блок-схему, состоящую из последовательно включенных импульсного генератора, испытуемого усилителя и ЭЛО; выходной сигнал усилителя снимается с согласованной нагрузки и подается на вход *Y* ЭЛО. По осциллограмме выходного сигнала (отклика на воздействие) можно судить об АЧХ и ФЧХ этого усилителя [Л. 4, 5, 10], однако обычно ограничиваются первой характеристикой.

На рис. 49 приведено несколько типичных осциллограмм откликов на входной сигнал (рис. 49,*а*).

В области низких частот составляющие спектра входного сигнала ослабляются (рис. 49,*б*) (завал частотной характеристики на **низких частотах).**

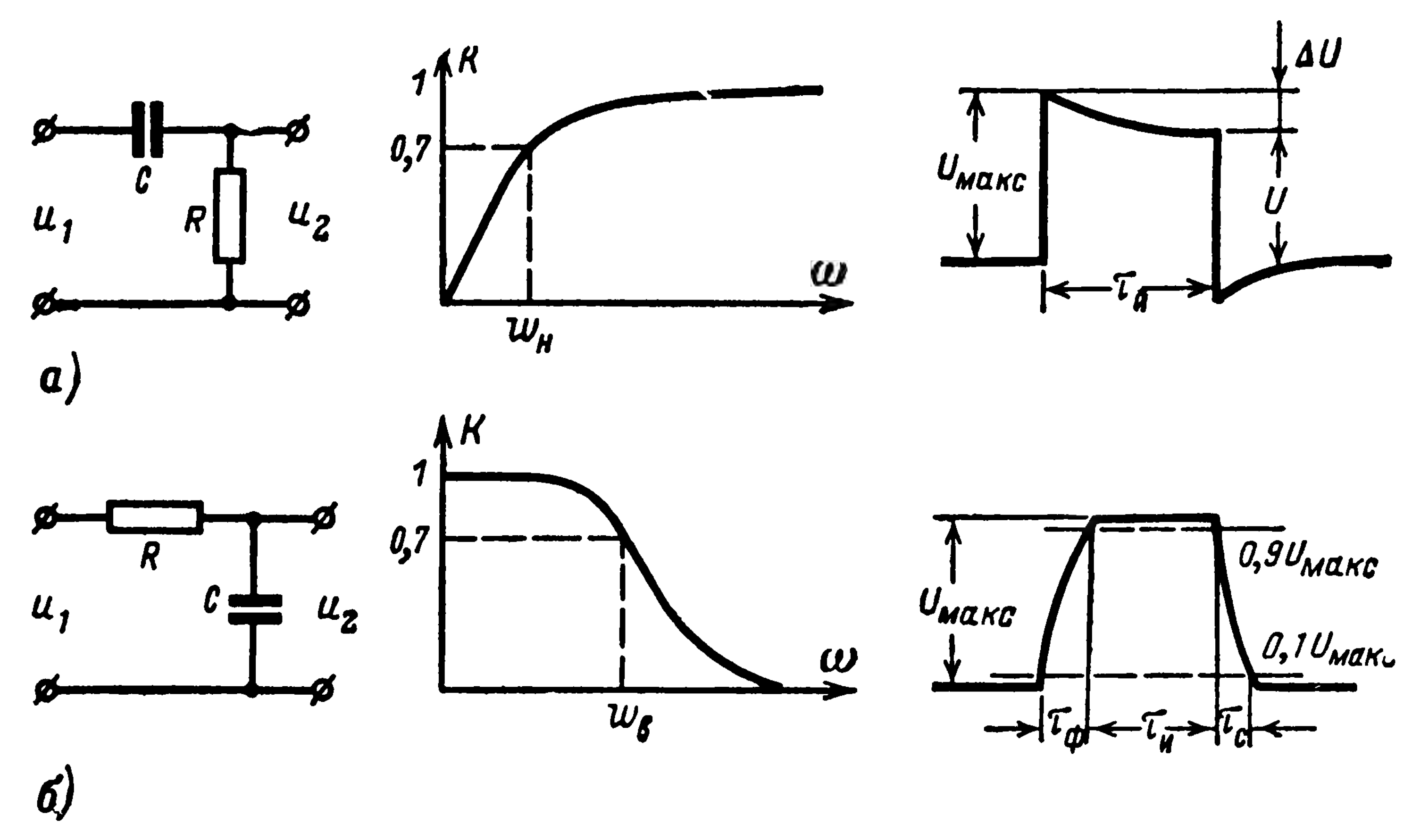


Рис. 48. Электрические схемы четырехполюсников, их АЧХ и обусловленные ими искажения сигналов.

В области низких частот составляющие спектра входного сигнала усиливаются (рис. 49,*в*) (подъем частотной характеристики на низких частотах).

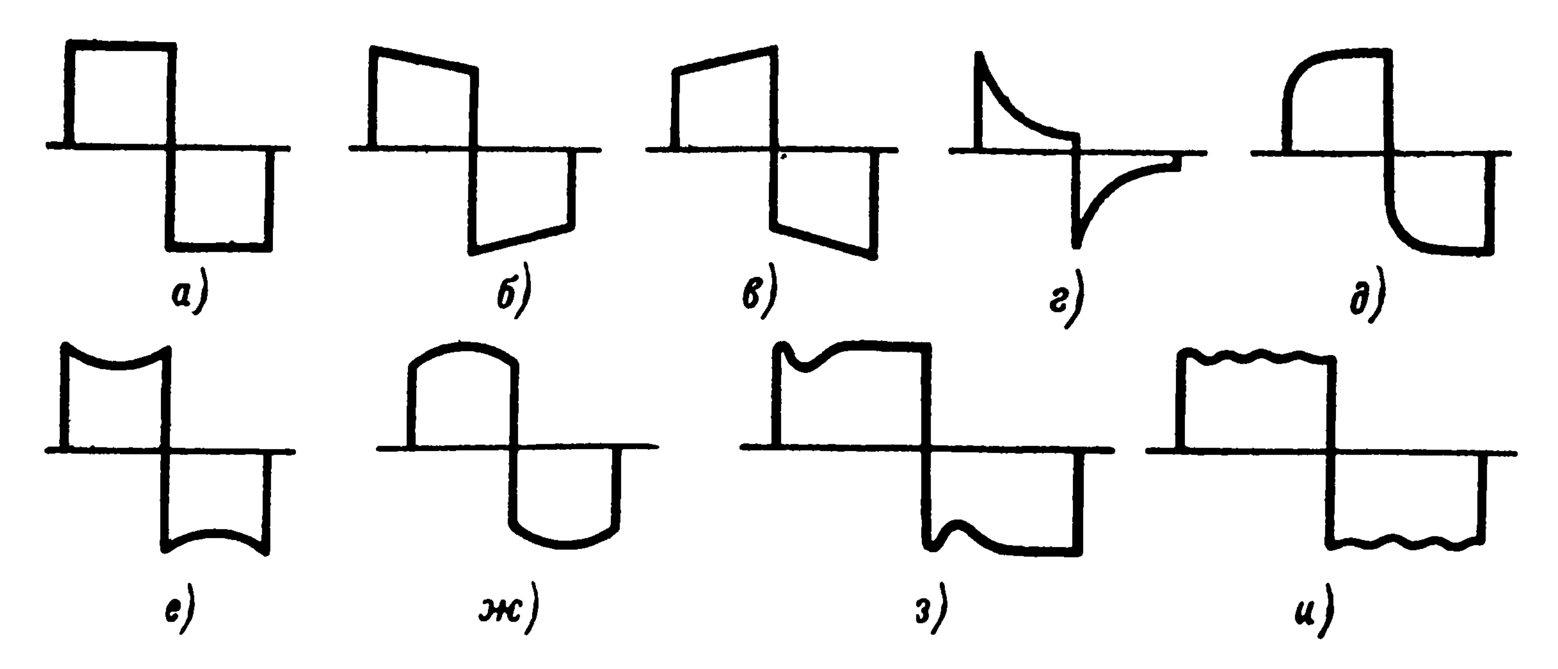


Рис. 49. Качественное определение АЧХ и ФЧХ по осциллограммам.

Постоянная времени разделительной цепи *RC* между каскадами усилителя (рис. 49,*г*) мала и входной сигнал дифференцируется.

В области высоких частот усиление снизилось (рис. 49,*д*), а фазовый сдвиг увеличился.

Амплитудно-частотная характеристика имеет подъем в области высоких частот (рис. 49,*е*), фазовая характеристика линейна.

Амплитудно-частотная характеристика приподнята в области низких частот (рис. 49,*ж*), фазовая характеристика линейна.

Коэффициент усиления не постоянен (рис. 49,*з*), на узком участке полосы пропускания он снижается.

Усилитель, кроме частот, лежащих в основной полосе пропускания, усиливает другие составляющие спектра в областях вне АЧХ (рис. 49,*и*) (усилитель резонирует).

Эти осциллограммы удобно наблюдать, сравнивая их с входным сигналом, для чего можно воспользоваться электронным коммутатором или двухлучевым ЭЛО.

Амплитуда входного импульса должна быть такой, чтобы он в четырехполюснике не ограничивался. Частоту следования импульсов нужно выбирать, исходя из полосы пропускания четырехполюсника: частота следования и высшие гармоники сигнала (примерно до 10—20) должны уложиться в полосу пропускания испытываемого устройства. Так, например, для низкочастотных усилителей с полосой пропускания 50 Гц — 10 кГц частоту следования импульсов можно взять равной $f_1=50$ Гц и $f_2=800\div1000$ Гц; для усилителей с полосой 50 Гц — 3 МГц соответственно $f_1=50$ Гц и $f_2=100\div200$ кГц.

Если импульсного генератора с такой частотой следования нет, то можно воспользоваться другим генератором, подавая от него на четырехполюсник импульс небольшой длительности ($\tau_и$ примерно 1—5 мкс) с известной длительностью фронта $\tau_ф$ и произвольной частотой следования. В таком случае верхняя граничная частота полосы пропускания четырехполюсника будет равна:

$$f_в=2{,}2/2\pi\tau_ф=0{,}35/\tau_ф.$$

Перед испытанием четырехполюсника с помощью прямоугольного напряжения нужно определить искажения, вносимые усилителем вертикального отклонения ЭЛО. Для этого подают сигнал импульсного генератора на ЭЛО непосредственно и сравнивают его форму с выходным сигналом четырехполюсника. Если ЭЛО дает небольшие амплитудные и фазовые искажения (около 5%), то истинные величины искажений, вносимые испытываемым устройством, равны разности общих искажений сигналов и искажений за счет ЭЛО.

Например, наблюдаемый на экране ЭЛТ импульс имеет спад вершины $\Delta U=20\%$, причем спад, обусловленный спадом импульса генератора, составляет 3%, а спад за счет ЭЛО 5%. Тогда спад вершины, обусловленный схемой четырехполюсника, составит 12%. Искажения, вносимые ЭЛО, тем меньше, чем шире полоса пропускания канала *Y*.

Рассмотрим осциллограммы импульсов, полученных при исследовании различных низкочастотных четырехполюсников (рис. 50). На рисунках показаны частотные характеристики и отклики четырехполюсников на прямоугольное напряжение при частоте следования импульсов 50 Гц и 2 кГц.

Частотная характеристика имеет завал в области низких частот и резкий выброс на частоте 10 кГц (рис. 50,*а*), что нашло отражение и в откликах. При частоте следования 50 Гц отклик очень быстро затухает, что и свидетельствует о завале частотной характеристики. При частоте следования 2 кГц фронт отклика достаточно крут, что говорит об увеличении в области высоких частот; волнистость на вершине выходного сигнала свидетельствует о явлении резонанса.

Устранение выброса в области высоких частот и некоторое увеличение усиления на низких частотах заметно сказались на обоих откликах (рис. 50,*б*).

Приближение частотной характеристики к линейной значительно улучшило форму откликов (рис. 50,*в*). На их форму наибольшее

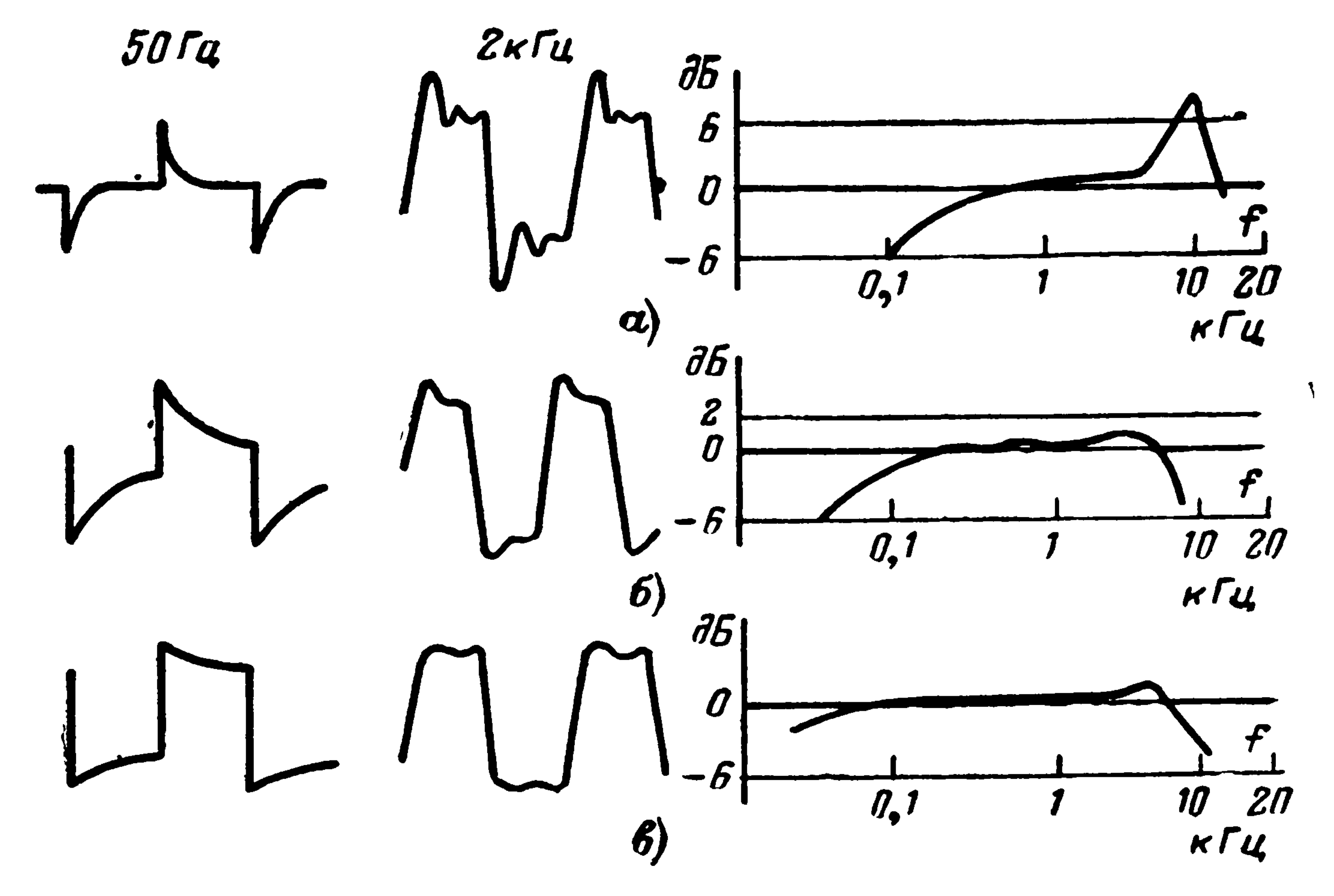


Рис. 50. Осциллограммы импульсов низкочастотных четырехполюсников.

влияние оказало изменение частотной характеристики в области низких частот, что больше всего отразилось на сигнале с частотой 50 Гц, где небольшой наклон плоской части свидетельствует о завале низкочастотных составляющих спектра.

Рассмотрим отклики на прямоугольные импульсы, прошедшие через широкополосный усилитель (рис. 51). Испытания велись на

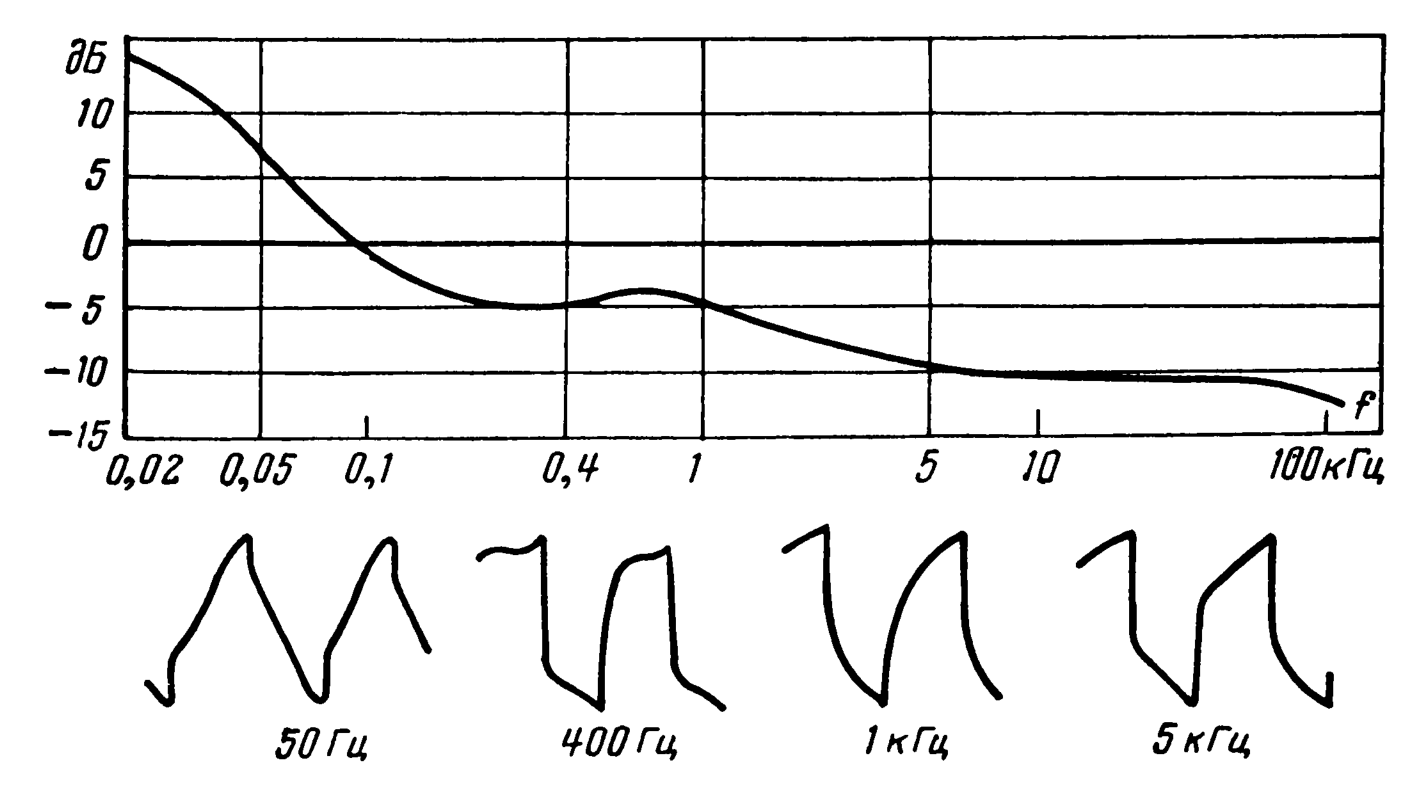


Рис. 51. Отклики на прямоугольные импульсы, прошедшие через усилитель.

различных частотах следования при одной и той же амплитуде входного напряжения. Выходная амплитуда откликов с помощью усилителя ЭЛО для всех частот устанавливалась одинаковой, что улучшало возможность их сопоставления. При этих испытаниях частотная характеристика канала ЭЛО имела следующие значения: 0—0,5 МГц с завалом на 2 дБ максимального значения; 0—1 МГц с завалом 6 дБ максимального значения; фазовая характеристика линейна во всем диапазоне полосы пропускания.

Отклик на испытательный сигнал с частотой 50 Гц говорит об усилении в области низких частот и снижении усиления в области высоких частот.

Отклики на сигналы с другими частотами следования в той или иной мере характеризуют снижение усиления в области высоких частот.

Спад ΔU выходного напряжения четырехполюсника можно охарактеризовать в долях периода импульсного сигнала. Измерение основано на том, что при снижении частоты прямоугольного сигнала спад выходного напряжения в конце полупериода возрастает (рис. 52), что позволяет найти время, определяющее спад вершины ΔU.

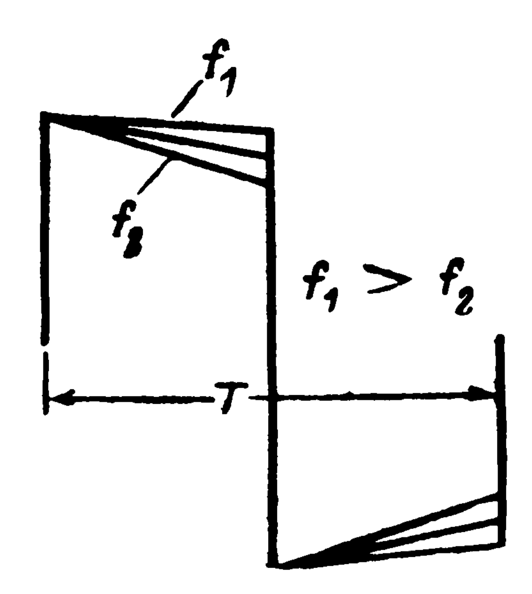


Рис. 52. Подбор заданного значения спада вершины импульса изменением частоты следования сигнала.

Положим, что при частоте $f_1 = 10$ кГц спад составляет 5%, а при частоте $f_2 = 1$ кГц спад равен 20%. Следовательно, интервал времени, в течение которого спад достигает указанного значения, будет равен $T_2/2 = 1/(2f_2) = 500$ мкс.

Аналогично может быть найден и фронт импульса $\tau_ф$. Например, при частоте следования импульсов f_0 получена осциллограмма (рис. 53,*а*) и нужно найти $\tau_ф$. Для этого частоту следования импульсов повышают до величины f_1, при которой получается осциллограмма вида рис. 53,*б* с амплитудой $0{,}9U_{макс}$. После этого продолжают повышать частоту до значения f_2, при котором получится осциллограмма импульса (рис. 53,*в*) с амплитудой $0{,}1U_{макс}$. Отсюда находим:

$$\tau_ф = 1/2f_1 — 1/2f_2.$$

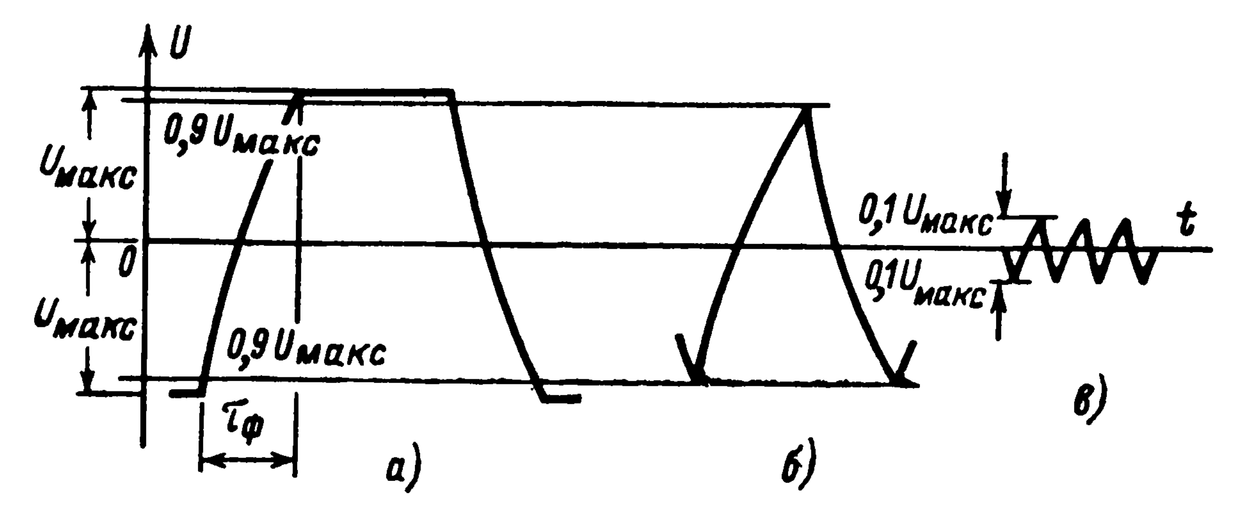


Рис. 53. Определение длительности фронта путем изменения частоты следования сигнала.

ПОЛУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП И ТРАНЗИСТОРОВ

При расчете и конструировании радиоэлектронных схем зачастую необходимо знать не усредненную характеристику электронной лампы или полупроводникового прибора, приведенную в справочнике, а ту, которую они имеют при определенном режиме питания схемы. Такую характеристику можно получить при помощи ЭЛО.

Наиболее типичными характеристиками электронных ламп являются: анодно-сеточная характеристика $i_а=f(u_с)$ при $u_а=\mathrm{const}$ и анодная характеристика $i_а=f(u_а)$ при $u_с=\mathrm{const}$.

Так как эти зависимости являются функциями одной переменной ($u_с$ или $u_а$), то они легко могут быть получены на экране ЭЛТ с помощью простой схемы (рис. 54,*а*).

Если, например, нужно снять анодно-сеточную характеристику, то на сетку подают постоянное напряжение смещения

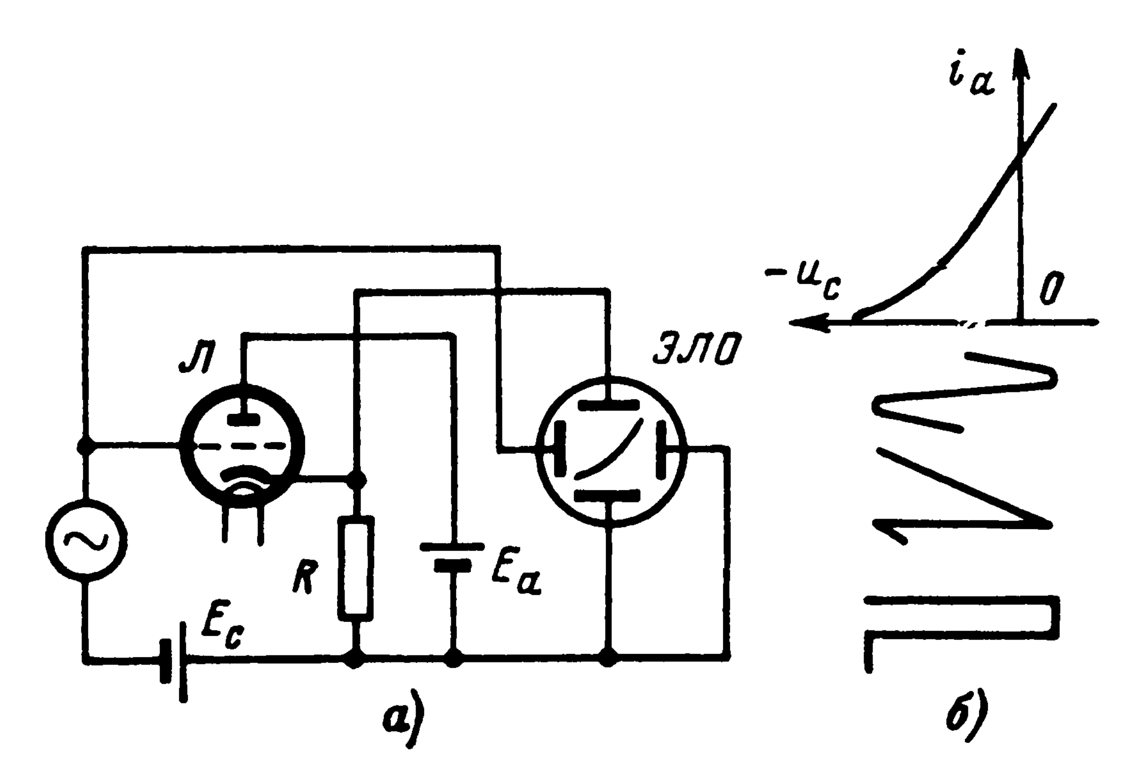


Рис. 54. Схема для получения характеристики электронной лампы.

$E_с$ и последовательно с ним включают источник периодического напряжения регулируемой амплитуды, которая будет изменять $u_с$ в заданных пределах. Анодное напряжение $E_а$ устанавливают таким, каким оно должно быть в исследуемой схеме. Периодическое изменение величины $u_с$ с частотой, превышающей 20 Гц, дает возможность наблюдать неподвижную осциллограмму характеристики на экране ЭЛТ, так как величина горизонтального отклонения луча пропорциональна изменению напряжения на сетке, а вертикального — анодному току лампы.

Таким периодическим напряжением может быть сигнал синусоидальный, импульсный или пилообразный (рис. 54,*б*).

Если же надо получить анодную характеристику, то источник переменного напряжения включают в анодную цепь лампы последовательно с источником питания $E_а$.

Применение ЭЛО не только ускоряет снятие характеристик, но и позволяет получить данные для таких комбинаций напряжений на электродах лампы, которые привели бы ее к повреждению даже

при кратковременных измерениях по другому методу. Например, описанная схема дает возможность довольно просто снять характеристики в области положительных напряжений на сетке, при которых рассеяние мощности не позволяет производить статических измерений.

Описанный метод применим и для снятия характеристик полупроводниковых приборов.

На рис. 55,*а* представлена схема [Л. 1], с помощью которой могут быть получены входные характеристики $U_б=f(I_б)$ при

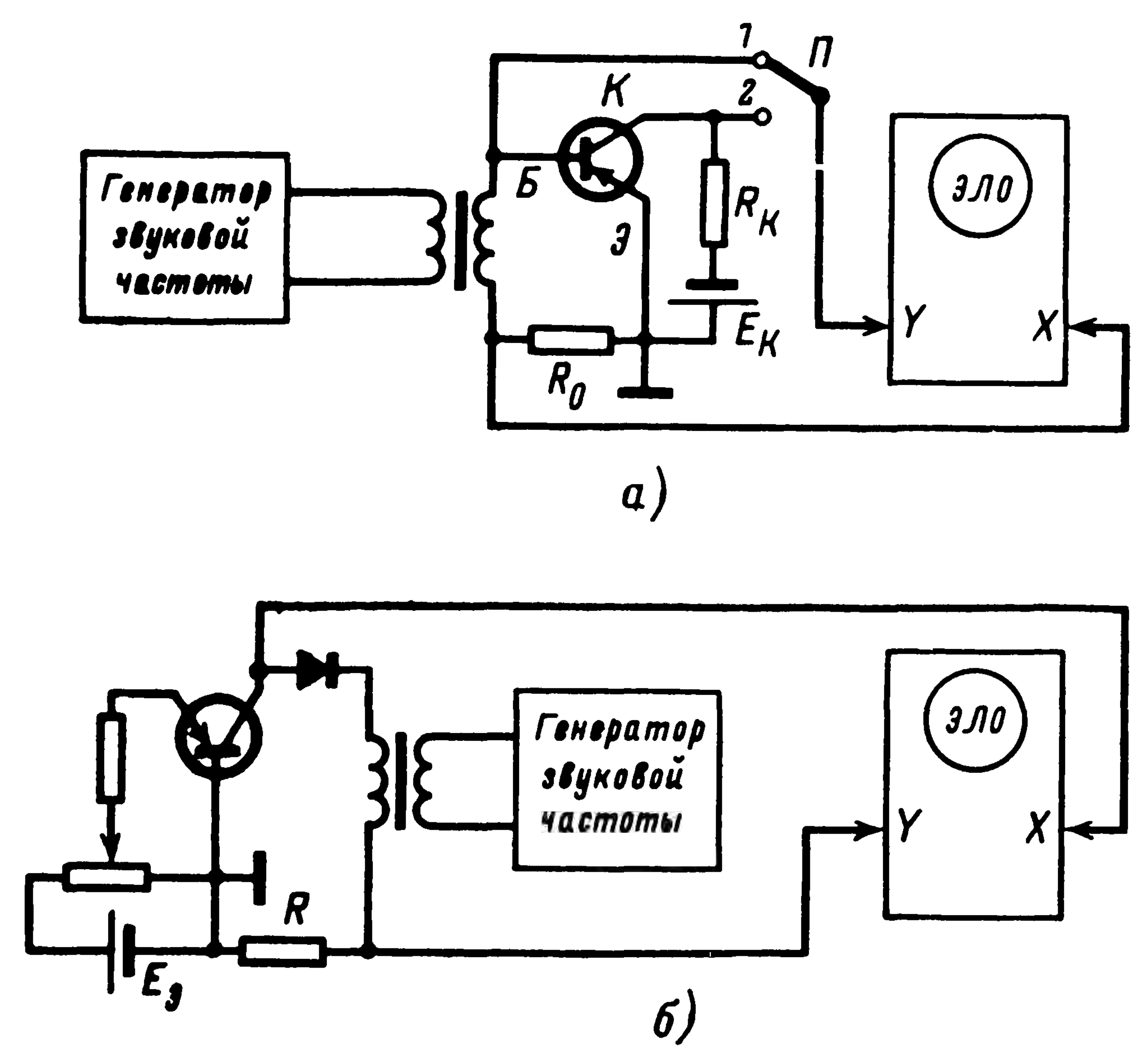


Рис. 55. Схемы для снятия характеристик транзисторов.

$E_к$=const и характеристика прямой передачи по току $I_к=f(I_б)$ при $E_к$=const для транзисторов, включенных по схеме с общим эмиттером. В этой схеме величины резисторов R_0 и $R_к$ значительно меньше сопротивлений соответствующих переходов испытываемого транзистора.

При снятии обеих характеристик напряжение горизонтальной развертки снимается с резистора R_0. Оно создается током базы $I_б$, вследствие чего величина горизонтального отклонения пропорциональна току базы $I_б$. При установке переключателя *П* в положение *1* на вход *Y* ЭЛО поступает напряжение базы $U_б$, снимаемое с точек *Б* и *Э*. В положении *2* переключателя на вход *Y* подается напряжение, создаваемое током коллектора $I_к$ на резисторе $R_к$. Устанавливая различные значения $E_к$, можно получить семейство характеристик.

Схема, приведенная на рис. 55,*б*, позволяет снимать выходные характеристики транзистора $I_к=f(U_к)$ при $I_э$=const,

включенного по схеме с общей базой. Диод в этой схеме ограничивает ток коллектора, когда переменное напряжение действует на коллектор в прямом направлении. Характеристики можно снимать при различных значениях тока эмиттера. Если $I_э=0$, то $I_к=I_{ко}$ и получается характеристика начального (неуправляемого) тока коллектора, который сильно зависит от температуры.

Аналогично может быть построена схема для снятия выходной характеристики транзистора при включении его по схеме с общим эмиттером.

При помощи ЭЛО возможно также определить время запаздывания — время, необходимое для рассасывания неосновных носителей зарядов. Этот параметр необходимо знать при подборе транзисторов для работы в быстродействующих переключающих устройствах. Схема измерительного стенда приведена на рис. 56,*а*.

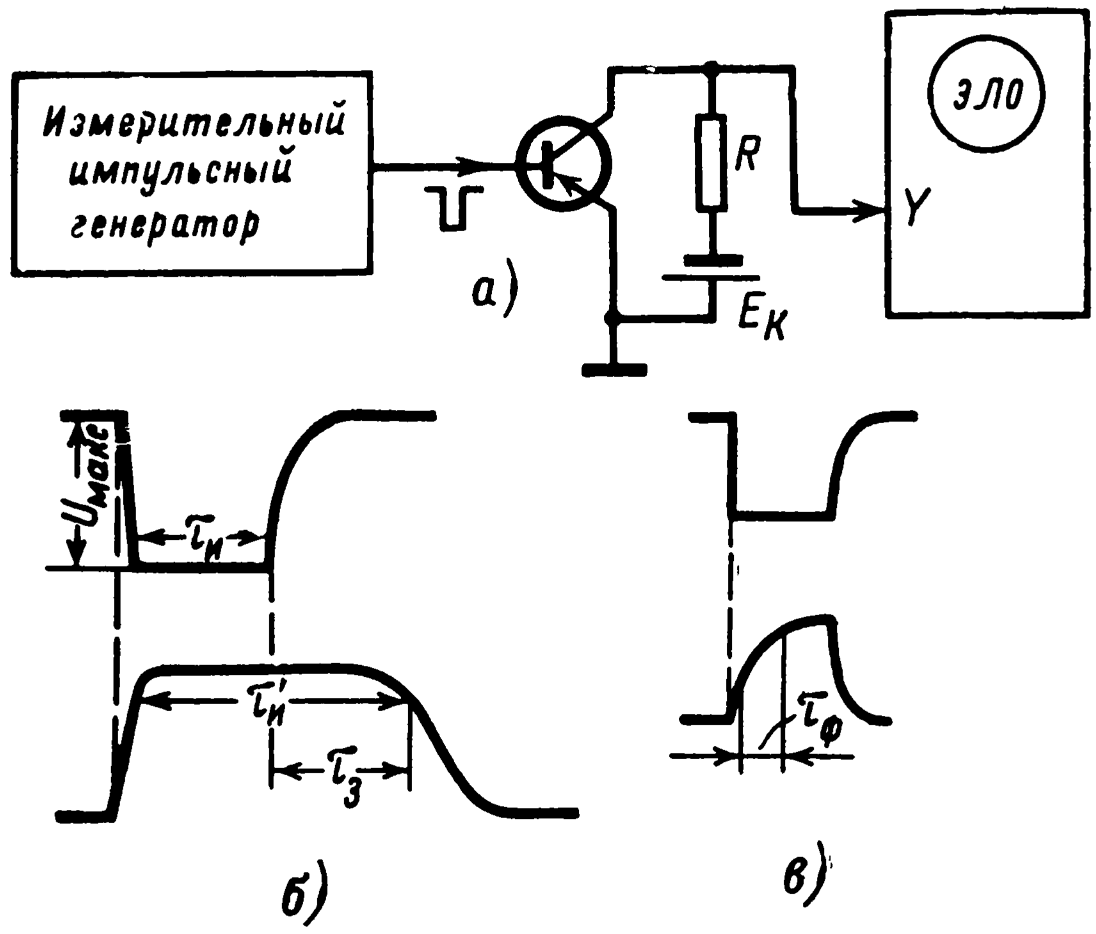


Рис. 56. Схема для определения времени запаздывания.

На базу транзистора от импульсного генератора подаются отрицательные импульсы $\tau_и$ длительностью порядка 5—10 мкс с большой скважностью ($T_и \gg \tau_и$) и амплитудой в несколько десятых долей вольта. Измерив с помощью ЭЛО длительность импульса $\tau_и'$ на выходе транзистора (на определенном уровне) и сравнив ее с длительностью $\tau_и$ входного импульса, находят время запаздывания $\tau_з$ (рис. 56,*б*).

На этой же установке можно получить переходную характеристику транзистора. Для этого на испытываемый транзистор подают сигнал большой скважности с крутым передним фронтом при амплитуде в несколько сотых долей вольта. На выходе получается импульс с относительно большим фронтом $\tau_ф$, протяженность которого характеризует возможность применения транзистора в импульсных схемах: чем больше $\tau_ф$, тем менее желательно его применение в быстродействующих устройствах (рис. 56,*в*).

До сих пор мы говорили об одиночных характеристиках. Однако при помощи характериографа — ЭЛО и относительно простой приставки (рис. 57) на экране ЭЛТ можно получить семейство характеристик электронных ламп или полупроводниковых приборов. Для этого надо снять одну характеристику при каком-то постоянном параметре, затем параметр изменить и снова снять ту же характеристику. Таким образом, для получения семейства характеристик необходимо устройство, которое изменяло бы определенный независимый параметр дискретно с частотой более 20 Гц.

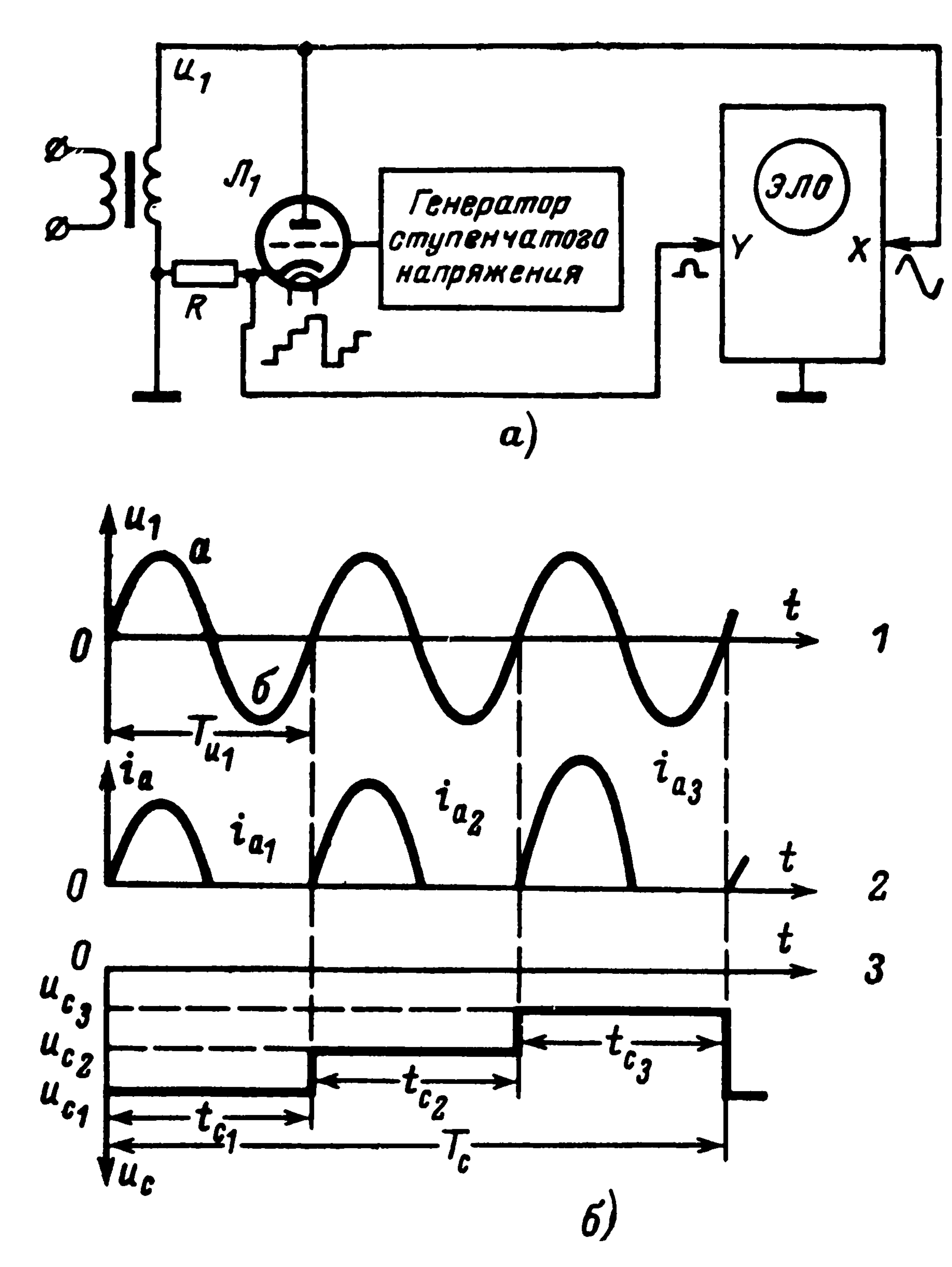


Рис. 57. Схема для снятия семейства характеристик.

Например, для получения семейства анодно-сеточных характеристик при изменении анодного напряжения $u_а$ от 60 до 240 В нужна схема, дискретно повышающая анодное напряжение ступенями на 60 В, т. е. задающая значения $u_а=60$, 120, 180, 240, 60, 120 В и т. д. с частотой более 20 Гц. В этом случае получится неподвижная осциллограмма семейства характеристик, состоящего из четырех отдельных зависимостей.

Устройство, обеспечивающее дискретное изменение режима питания испытываемого прибора, представляет собой генератор

ступенчатого напряжения, число и уровни ступеней которого можно регулировать и устанавливать в зависимости от вида снимаемой характеристики.

Принцип действия характериографа при снятии анодных характеристик состоит в следующем (рис. 57,*а*). В анодную цепь лампы $Л_1$ и на вход *X* ЭЛО подают гармонический сигнал низкой частоты u_1, например, от сети переменного тока (рис. 57,*б*, *1*), под действием которого в течение первого периода $T_{и1}$ в анодной цепи течет ток $i_{а1}=f(u_1)$ при $u_{с1}=\text{const}$ (рис. 57,*б*, *2*). Величина резистора *R* в катодной цепи лампы невелика, поэтому $u_а=u_1$, т. е. $i_{а1}=f(u_а)$. В результате на экране ЭЛТ за первый период сигнала u_1 появится одна анодная характеристика.

Для получения семейства характеристик сеточное смещение лампы $Л_1$ периодически ступенчато изменяют так, чтобы $T_с=$ $=nTu_1$, где $n=1$, 2, 3 ... (рис. 57,*б*, *3*).

За второй период сигнала смещение становится равным $u_{с2}$ и за третий $u_{с3}$, в результате чего получается семейство из трех характеристик. Более подробно со схемой генератора ступенчатого напряжения можно ознакомиться в [Л. 3].

Для улучшения качества осциллограммы на участке *а—б* каждого периода напряжения u_1 особый узел характериографа гасит луч ЭЛТ, что дает возможность наблюдать лишь ту часть процесса, которая соответствует нарастанию анодного тока. Если откалибровать масштабную сетку ЭЛТ в соответствующих единицах, то можно получать числовые значения снимаемых характеристик.

Рассмотрим схему приставки [Л. 16], которую можно подключать к любому ЭЛО и получать на ЭЛТ семейство характеристик транзисторов различных типов, в том числе и полевых, включаемых по схеме с общим истоком.

Характеристики позволяют: определять величины коэффициента усиления по постоянному В и переменному току β, напряжения насыщения, напряжения пробоя коллектора и выходного динамического сопротивления; наблюдать влияние температуры на характеристики транзистора; изменять температуру либо внешним подогревом транзистора, либо подачей большого напряжения смещения, что ведет к самонагреву транзистора; исследовать входные характеристики; получать вольт-амперные характеристики диодов и фотоэлементов различных типов; подбирать транзисторы по входным и выходным параметрам; исследовать точечные транзисторы с малым напряжением пробоя и большим напряжением насыщения, а также с небольшим значением β.

В приставке вырабатывается непрерывно изменяющееся напряжение соответствующей полярности, которое подается на коллектор испытываемого транзистора. Одновременно через добавочное сопротивление ступенчатое напряжение поступает на базу транзистора, образуя ступеньки тока. Для упрощения схемы напряжение развертки, подаваемое на вход *X* ЭЛО и вырабатываемое двухполупериодным выпрямителем сетевого напряжения, не фильтруется. Принципиальная схема приставки приведена на рис. 58.

Устройство состоит из генератора ступенчатого напряжения (транзисторы T_1—T_3), эмиттерного повторителя (транзисторы T_4—T_5), выходного устройства (диоды $Д_1$—$Д_2$ и добавочные резисторы R_{11}—R_{23}) и источника питания, с которого напряжение подается на коллектор исследуемого транзистора и на входы *X* и *Y* ЭЛО.

Генератор ступенчатого напряжения. На полевом транзисторе T_1 собран релаксационный генератор, режим работы которого подбирается потенциометром R_2. Заряженный от источника питания конденсатор C_1 разряжается через резисторы R_2, R_3 до тех пор, пока напряжение затвора транзистора не станет равным 8—10 В. Как только такое напряжение будет достигнуто, транзистор резко

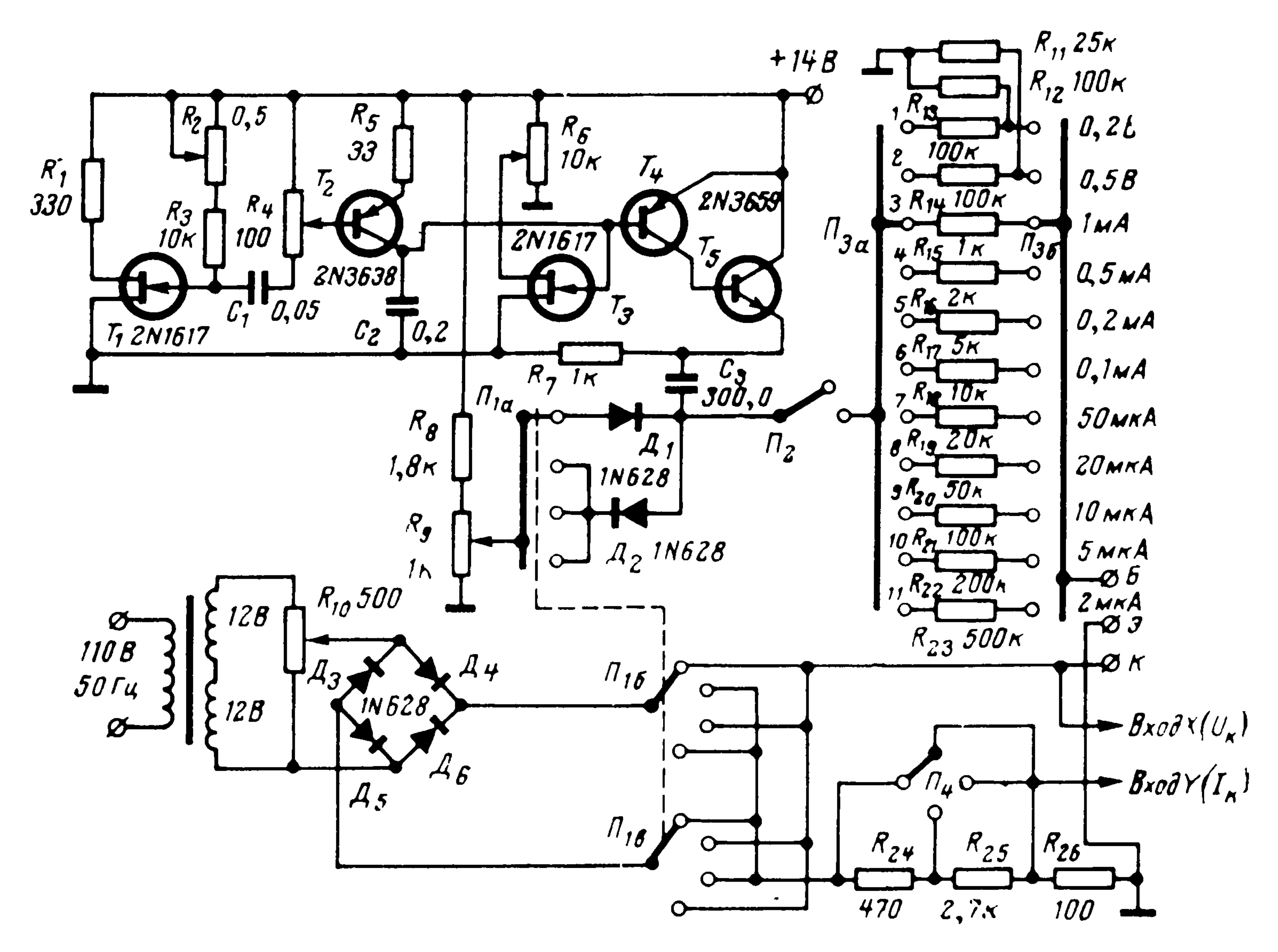


Рис. 58. Схема приставки для получения на ЭЛТ семейства характеристик транзисторов.

отпирается в направлении от затвора к истоку (корпусу), вырабатывая короткий отрицательный импульс, который через конденсатор C_1 подается на базу транзистора T_2.

Транзистор T_2 управляется этим импульсом таким образом, чтобы при каждом его поступлении напряжение на конденсаторе C_2 снижалось на некоторую постоянную величину, образуя одну ступеньку. Потенциометром R_4 устанавливается уровень напряжения ступеньки.

С помощью полевого транзистора T_3 осуществляется восстановление исходного состояния генератора в тот момент, когда напряжение на конденсаторе C_2 достигает некоторого минимального значения. Потенциометром R_6 устанавливается число ступенек (до восьми).

Эмиттерный повторитель. Транзисторы T_4, T_5 включены по схеме составного транзистора, образуя эмиттерный повторитель, который обеспечивает высокое входное сопротивление генератору ступенчатого напряжения и изолирует его от нагрузки. На выходе повторителя (резистор R_7) выделяется напряжение ступенчатой формы, поступающее через конденсатор C_3 на выходное устройство.

Выходное устройство. Диоды $Д_1$, $Д_2$ меняют полярность сту-

пенчатого сигнала в зависимости от положения переключателя $П_{1а}$. Потенциометром R_9 постоянное напряжение смещения можно установить таким, при котором испытываемый транзистор будет заперт ($I_б=0$).

С помощью добавочных резисторов R_{15}—R_{23}, переключателя $П_3$ устанавливается режим питания базы. Например, если поставить переключатель в положение *6*, то ток базы каждой характеристики будет отличаться на 0,1 мА.

Питание коллектора. Источник питания коллекторной цепи испытываемого транзистора и входов ЭЛО собран на диодах $Д_3$—$Д_6$ по мостовой схеме, напряжение на входе которой регулируется потенциометром R_{10}. Переключателями $П_{1б}$ и $П_{1в}$ на входе меняется полярность напряжения в зависимости от типа транзистора. Резисторы R_{24}—R_{26} включены последовательно с эмиттером, предохраняя коллекторный переход от повреждения при большой мощности рассеяния. С резистора R_{26} на вход *У* ЭЛО снимается напряжение, которое пропорционально току коллектора (0,1 В на 1 мА).

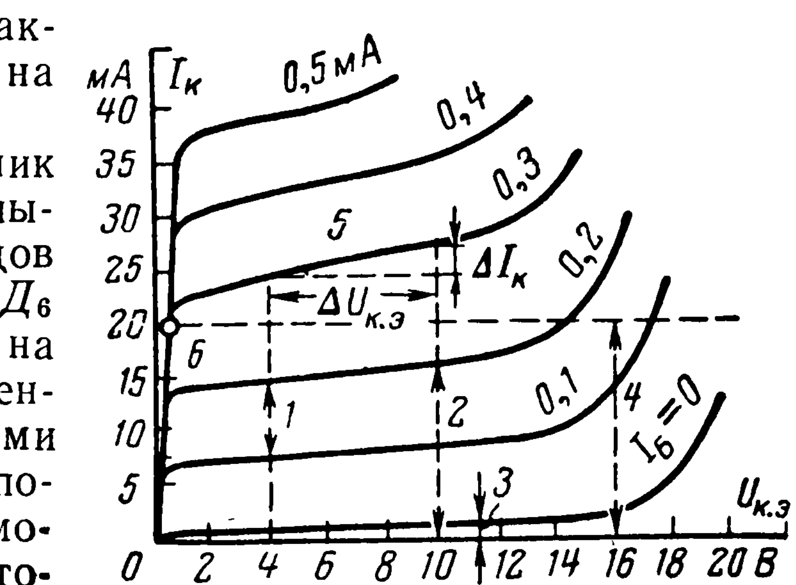


Рис. 59. Выходные характеристики транзистора при нескольких значениях тока базы.

На рис. 59 показаны выходные характеристики транзистора при нескольких значениях тока базы. По ним можно определить следующие параметры:

1. Коэффициент усиления β по переменному току

$$\beta=\frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}=\frac{15-7,5}{0,2-0,1}=75$$

(при $U_{к\,э}=4$ В, $I_к=15$ мА).

2. Коэффициент усиления В по постоянному току

$$B=\frac{I_к}{I_б}=\frac{16}{0,2}=80$$

(при $U_{к\,э}=10$ В, $I_к=16$ мА).

Остаточный ток коллектора $I_{к0}=1$ мА при $U_{к\,э}=11$ В.

3. Ток отсечки коллектора $I_{б0}\approx I_{к0}/\beta=1/75=13$ мкА.
4. Напряжение пробоя транзистора $U'_{к\,э}=16$ В при $I_б=0,2$ мА.
5. Динамическое выходное сопротивление

$$R_{вых}=\frac{\Delta U_{к.э}}{\Delta I_к}=\frac{6В}{2,5мА}=2,4\ кОм$$

(при средних значениях $U_{к.э}=7$ В и $I_к=25$ мА).

6. Напряжение насыщения $U_{к\,н}=0,5$ В при $I_к=20$ мА.

Примечание. Нумерация параметров совпадает с нумерацией на рис. 59, где отмечены те участки семейства характеристик, по которым находят соответствующий параметр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мирский Г. Я.** Радиоэлектронные измерения. М., «Энергия», 1969, 528 с.

2. **Ремез Г. А.** Радиоизмерения. М., «Связь», 1966, 421 с.

3. **Полулях К. С.** Электронные измерительные приборы. М., «Высшая школа», 1966, 400 с.

4. **Корндорф С. Ф. и др.** Сборник задач и упражнений по радиотехническим измерениям. М., Госэнергоиздат, 1962, 160 с.

5. **Новопольский В. А.** Электроннолучевой осциллограф М., «Энергия», 1969, 424 с.

6. **Самойлов В. Ф. и др.** Импульсная техника. М., «Связь», 1966, 280 с.

7. **Момот Е. Г.** Радиотехнические измерения. М., Госэнергоиздат, 1957, 364 с.

8. **Вишенчук И. М. и др.** Электромеханические и электронные фазометры. М., Госэнергоиздат, 1962, 207 с.

9. **Адоменас П. и др.** Измерители амплитудно-частотных характеристик и их применение. М., «Связь», 1968, 164 с.

10. **Термен Ф. и др.** Измерительная техника в электронике. М.. Изд-во иностр. лит., 1955, 568 с.

11. Электрические измерения. Под ред. А. В. Фремке. М., Госэнергоиздат, 1963, 430 с.

12. **Miller A. K.** Controlled wide-range quadrature phase-shift network. — «Electronic Letters», 1969, v. 5, № 23, p. 558.

13. **Nadolski P. M.** Phase indicator. Пат. США, кл. 324-88, № 2816266.

14. **Редькина Л. И. и Редькин Б. Е.** Электронные коммутаторы к осциллографам. М., «Энергия», 1969, 64 с.

15. **Кузнецов А. С.** Цифровая техника для радиолюбителей. М., «Энергия», 1972, 96 с.

16. **Metzger D.** Transistor and FET curve tracer. — «Electronics World», 1971, v. 86, № 2, p. 52.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 20 коп.

